

Aufbau eines Kalibriersystems zur Schubmessung (μN) basierend auf Photonendruck

Masterarbeit
im Fachbereich Mathematik und Technik
Hochschule Koblenz

Autor: Torben Sehnert
aus Dieburg
Matrikelnummer: 519975
15.05.2014

angefertigt am
Institut für Technische Physik (ITP)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Stuttgart

Referent: Prof. Dr. Thomas Wilhein
Korreferent: Prof. Dr. Jens Bongartz

Zusammenfassung

Titel:	Aufbau eines Kalibriersystems zur Schubmessung (μN) basierend auf Photonendruck
Autor:	Torben Sehnert
Referent:	Prof. Dr. Thomas Wilhein
Korreferent:	Prof. Dr. Jens Bongartz
Zusammenfassung:	<p>Diese Arbeit befasst sich mit der Aufgabe, ein Kalibriersystem für Schubmessungen im μN-Bereich basierend auf Photonendruck zu realisieren.</p> <p>Hierzu wurden zwei ineinander verschachtelte Laserresonatoren aufgebaut. Durch Reflektion der Strahlung an einem Spiegel, der sich auf einer Torsionswaage befindet, wurden definierte Kräfte übertragen, die sich im Bereich von $0,5 \mu\text{N}$ bis $250 \mu\text{N}$ befinden. Hierbei wurden verschiedene Betriebsmodi der Waage verwendet (Open- und Closed-Loop).</p> <p>Durch Vergleich der theoretisch durch die Laserstrahlung aufgebraachten Kräfte mit Kräften, die sich durch das Wägesystem und den Betriebsmodus ergeben, konnte festgestellt werden, dass eine Kalibration mittels Photonendruck möglich ist.</p> <p>Der Vorteil dieser Kalibriermethode ist die absolute Trennung von Kalibrier- und Messvorgang. Nachteilig sind der hohe Material- und Energieaufwand sowie die primär durch die Leistungsmessung des Lasers bedingte Ungenauigkeit.</p>
Datum:	15.05.2014

Abstract

Title: Construction of a calibration system for force measurements (μN) based on radiation pressure

Author: Torben Sehnert

First Reviewer: Prof. Dr. Thomas Wilhein

Second Reviewer: Prof. Dr. Jens Bongartz

Summary: This work deals with the challenge of realizing a calibration system based on radiation pressure for thrust measurements in the μN region.
For this, two nested laser resonators were built. By reflecting the radiation on a mirror which is mounted on a torsional balance, defined forces in the range from $0.5\ \mu\text{N}$ to $250\ \mu\text{N}$ are transferred. The balance is hereby operated in different modes (open- and closed-loop).
By comparison of the theoretically applied forces from laser radiation and forces that are investigated by the characteristics of the balance, it can be concluded that a calibration based on radiation pressure is possible.
The advantage of this calibration method is the absolute separation of calibration and measurement process. Disadvantages are the complexity and the inaccuracy induced by the power measurement of the laser radiation.

Keywords: microbalance calibration, radiation pressure, thin-disk laser

Date: 15/05/2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Mikroantriebe und ihr Einsatzgebiet	1
1.2	Experimentelle Untersuchung laser-ablativer Mikroantriebe am ITP . . .	4
1.3	Kalibration der Schubwaage	5
1.4	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	6
2	Grundlagen	7
2.1	Strahlungsdruck	7
2.2	Scheibenlaser	9
2.3	Relayabbildung	11
2.4	Schubwaage	12
3	Versuchsaufbau	14
3.1	Resonatordesign	14
3.1.1	Intracavity-Modus	14
3.1.2	Extracavity-Modus	17
3.1.3	Polarisationsoptik	18
3.2	Realer Aufbau	20
4	Messungen	26
4.1	Auskoppelgrad	26
4.2	Laserleistung	28
4.3	Messungen mit Analysewaage	29
4.4	Federkonstante	32
4.5	Tauchspulenkalibration	34
4.6	Vergleich der Kräfte im Open-Loop-Betrieb	34
4.7	Vergleich der Drehmomente im Closed-Loop-Betrieb	37
4.8	Messungen im Extracavity-Modus	38
5	Kalibration	43
5.1	Voraussetzungen für die Kalibrationen	43
5.2	Ermittlung der Kalibrationsgleichungen	43
5.2.1	Open-Loop	44
5.2.2	Closed-Loop	44
5.3	Vergleich der Kalibrationsgleichungen	47
5.3.1	Open-Loop	47
5.3.2	Closed-Loop	48

5.4	Einige Fehlerquellen	49
5.5	Kraftbereich und Schubinkrement	50
5.6	Vor- und Nachteile der Kalibriermethoden	51
6	Zusammenfassung und Ausblick	52
6.1	Weitere Vorgehensweise	53
6.2	Leistungsmessung durch Kraftmessung	54
	Abkürzungsverzeichnis	57
	Literaturverzeichnis	58
	Abbildungsverzeichnis	61
	Tabellenverzeichnis	63

1 Einleitung

In einer Zeit, in der die Erschließung des Weltalls immer weiter voranschreitet, ergeben sich auch für Wissenschaft und Technik immer neue Aufgaben. Eine dieser Aufgaben ist es, Satelliten hochgenau positionieren und auf ihrer Bahn erhalten zu können.

Je nachdem, in welchem Bereich des Weltalls man sich befindet, wirken verschiedene Störkräfte auf einen Satelliten. Im Low Earth Orbit (LEO), also in einer Höhe von 200 km bis 1200 km über der Erde, ist der Luftwiderstand, bedingt durch die Restatmosphäre der Erde, die Störgröße mit dem höchsten Einfluss. Die hierdurch übertragene Kraft kann bis zu 1 mN betragen. Außerhalb der Erdatmosphäre stellt der Strahlungsdruck der Sonne die dominanteste Störgröße dar; ihr Einfluss liegt in einer Größenordnung von $10 \mu\text{N}$ bis $100 \mu\text{N}$. Weitere Effekte, welche sich störend auswirken können, sind zum Beispiel der Strahlungsdruck der Erdalbedo und durch Magnetfelder induzierte Lorentzkräfte [1].

1.1 Mikroantriebe und ihr Einsatzgebiet

Ein Anwendungsgebiet für Mikroantriebe ist der Formationsflug mehrerer Satelliten. Abbildung 1.1 zeigt den Orbit der Mission *Laser Interferometer Space Antenna (LISA)*, bei der drei Satelliten auf einer erdähnlichen Bahn ein Laserinterferometer bilden. Die einzelnen Interferometerarme haben hierbei eine Länge von $5 \cdot 10^9 \text{ m}$ mit einer Genauigkeit von 1 %. Die Satelliten folgen der Erde in einer Entfernung von etwa $50 \cdot 10^9 \text{ m}$, so dass der Strahlungsdruck der Sonne den größten Einfluss auf den Orbit der Satellitenformation hat ($\sim 9 \mu\text{N}$) [2]. Ähnlich ist auch der Orbit der geplanten Nachfolgemission eLISA, bei der allerdings die Abstände zwischen den einzelnen Satelliten geringer sind [3].

Um die Satelliten auf einen von allen Störgrößen befreiten, idealen geodätischen Orbit zu bewegen, sind Antriebe nötig, die nicht nur einen geringen Schub bieten, sondern auch ein sehr kleines Schubinkrement. Eine wichtige Größe zur Charakterisierung von Antrieben ist der spezifische Impuls:

$$I_{\text{sp}} = \frac{\int_0^T F_t dt}{g \int_0^T \dot{m}_e dt} \quad (1.1)$$

Der spezifische Impuls ist definiert als die Schubkraft im Verhältnis zur Massenflussrate des Treibstoffes pro Zeiteinheit und stellt somit eine Kenngröße dar, die die Effektivität eines Antriebs beschreibt. Die Einheit des spezifischen Impulses ist die Sekunde.

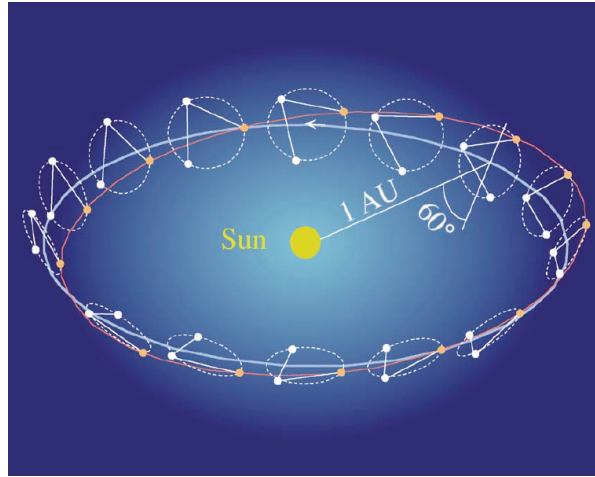


Abbildung 1.1: In Rot ist hier der Orbit eines LISA-Satelliten eingezeichnet. Der blaue Kreis zeigt den Orbit der Erde, die der Satelliten-Formation um 20° vorausleitet [2].

Geht man davon aus, dass die Austrittsgeschwindigkeit bei laser-ablativen Antrieben eine Konstante ist, so kann der spezifische Impuls durch folgenden Term vereinfacht beschrieben werden [4].

$$I_{\text{sp}} = \frac{v_{\text{Jet}}}{g} \quad (1.2)$$

Hierbei ist v_{Jet} die Austrittsgeschwindigkeit des Treibstoffes und g die Beschleunigung im Erdschwerefeld.

Im Folgenden werden einige Mikroantriebskonzepte vorgestellt:

- Gas Proportional Thrusters

Bei *Gas Proportional Thrusters* wird der Effekt genutzt, dass sich die Bewegungsgeschwindigkeit eines Gases erhöht, wenn es durch eine Verengung, wie zum Beispiel eine Düse, gedrückt wird. Der Schub solcher Triebwerke ist kleiner als 10 mN und der spezifische Impuls beträgt ungefähr 130 s [1]. Vorteile dieses Antriebskonzeptes sind eine hohe Ausfallsicherheit und ein geringes Schubinkrement. Nachteile sind der geringe spezifische Impuls und das daraus resultierende hohe Eigengewicht. Eingesetzt wurde diese Antriebsart zum Beispiel bei der NASA-Mission *Gravity Probe B*.

- Field Emission Electric Propulsion (FEEP)

FEEP ist ein Antriebskonzept, bei dem ein ionisierter Treibstoff mittels eines elektrischen Feldes beschleunigt wird. Hierzu wird ein metallischer Treibstoff (z. B. Caesium oder Indium) mittels einer Heizvorrichtung in seinem Tank flüssig gehalten. Der flüssige Treibstoff fließt durch eine Kapillare und wird hiernach durch ein starkes elektrisches Feld ionisiert und beschleunigt [5]. Der so erzeugte Schub beträgt zwischen 0,1 und 100 μN [6]. Ein Vorteil von FEEP-Antrieben ist der sehr

hohe spezifische Impuls von bis zu 8000 s [7]. FEEP-Antriebe sollen zum Beispiel bei der Mission *LISA-Pathfinder* eingesetzt werden.

- Microelectromechanical Systems (MEMS)–based Thrusters
Unter MEMS-basierten Antrieben versteht man Antriebe, welche in Mikrosystemtechnik realisiert sind, das heißt, dass die einzelnen Komponenten entweder diskret oder monolithisch in Halbleitermaterialien zu einem miniaturisiertem System zusammengefasst werden. Zur Zeit befinden sich verschiedene Versionen solcher Antriebe in Entwicklung (zum Beispiel *Vaporizing Liquid Microthruster (VLM)* und *Micro-Ion Engine*). Die grundlegenden Vorteile von MEMS-basierten Antrieben sind die kleinen Abmessungen, die geringe Masse sowie der niedrige Energieverbrauch. Nachteilig sind die geringen spezifischen Impulse (< 100 s bei VLM) [8].
- Laser-ablative Mikroantriebe
Bei Laser-ablativen Mikroantrieben wird durch energiereiche Laserpulse auf einem Material, welches als Treibstoff dient, ein Plasma induziert. Das ablatierte Material liefert Schub in der Größenordnung von μN bei spezifischen Impulsen von mehr als 3000 s [9]. Unter anderem mit der Untersuchung solcher Antriebe befasst sich das Institut für Technische Physik des DLR.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein idealer Mikroantrieb einen hohen spezifischen Impuls besitzen sollte. Bestenfalls sollte er Schubkräfte im Bereich μN bis mN erzeugen können, aber dennoch ein kleines Schubinkrement besitzen. Der Energieverbrauch, die Masse und die Abmessungen des Triebwerks sollten möglichst gering sein. Des Weiteren ist eine lange Lebensdauer sowie eine hohe Zuverlässigkeit zwingend notwendig.

Ein weiteres geplantes Einsatzgebiet von Kraftübertragung mittels laserinduzierter Ablation ist die Entfernung von Weltraumschrott aus dem LEO. Studien haben gezeigt, dass die Anzahl von Bruchstücken im LEO exponentiell steigt. Hierbei stellen vor allem Bruchstücke mittlerer Größenordnung (1 cm bis 10 cm) ein hohes Risiko dar. Während größere Bruchstücke detektiert und umflogen werden können und kleinere Bruchstücke durch verstärkte Außenwände der Satelliten davon abgehalten werden können, Schaden anzurichten, gibt es für Weltraumschrott mittlerer Größe zur Zeit noch keine anwendbare Problemlösung. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des EU-Projektes CLEANSPACE die Möglichkeit untersucht, mithilfe eines bodengestützten Lasers mit hoher Pulsenergie durch laserinduzierte Ablation den Orbit von Trümmerteilen zu beeinflussen und somit einen schnelleren Wiedereintritt in die Erdatmosphäre herbeizuführen [10]. Weltraumschrott, der sich normalerweise für Jahre in der Erdumlaufbahn befinden würde, könnte so bei jedem Umlauf weiter abgebremst werden, bis er nach einigen Tagen in einem niedrigen Orbit verglüht.

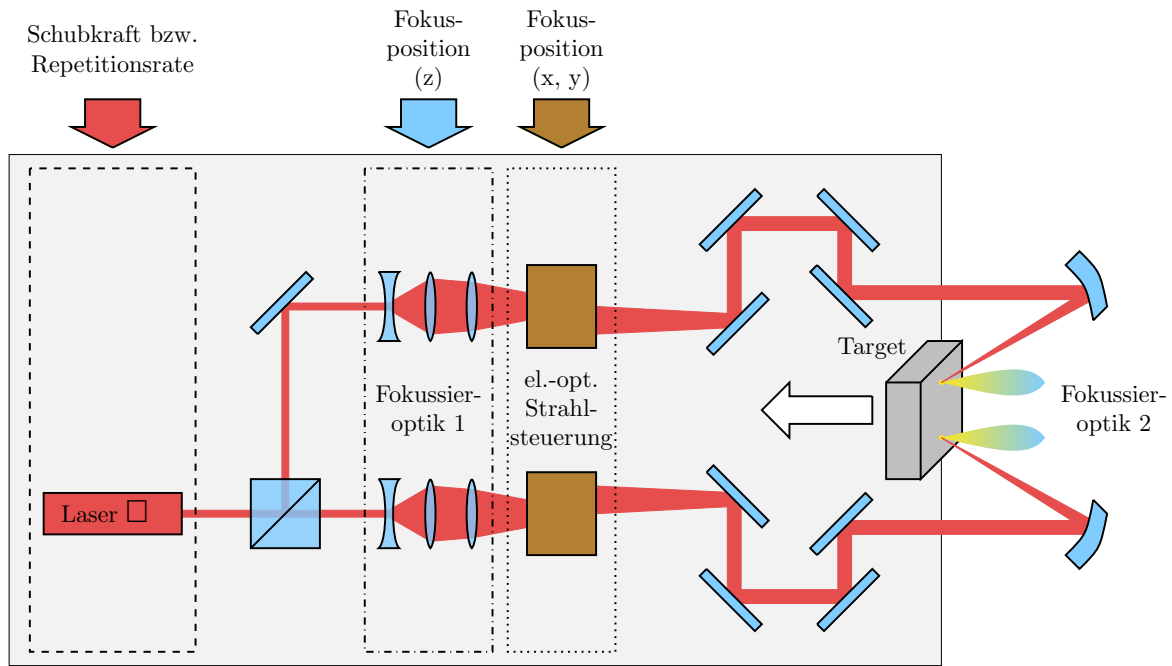


Abbildung 1.2: Konzept eines laser-ablativen Mikroantriebs (nach [11])

1.2 Experimentelle Untersuchung laser-ablativer Mikroantriebe am ITP

Da bestehende Konzepte zu Mikroantrieben nicht alle Anforderungen erfüllen, ist es das Ziel des ITP, einen laser-ablativen Antrieb zu entwickeln, der den gehobenen Ansprüchen genügt.

Abbildung 1.2 zeigt das entwickelte Konzept. Eine Besonderheit des Antriebs ist hierbei, dass er ohne bewegliche Teile auskommen soll. Da jedoch das metallische Target Schicht für Schicht ablatiert werden muss, um Kraterbildung und somit Unregelmäßigkeiten im Schub zu verhindern, ist eine Strahlsteuerung in x-, y- und z-Richtung nötig. Diese Strahlsteuerungen sollen mithilfe von KTN-Kristallen realisiert werden; erste Untersuchungen bezüglich der Fokusposition senkrecht zur Ausbreitungsrichtung finden zur Zeit statt [12]. Die Schubkraft wird über die Repetitionsrate des Lasers steuerbar sein [13].

Zur Optimierung der verschiedenen Parameter wurden Gütefaktoren definiert, welche in den experimentellen Einrichtungen untersucht werden (Abbildung 1.3). Das bei Beschuss des Targets entstehende Plasma und die darin enthaltenen ablatierten Materialien werden mit Hilfe von Faraday-Bechern und optischen Diagnosemitteln untersucht [14]. Die Oberfläche des Targets wird mit einem Profilometer analysiert und gibt unter anderem darüber Aufschluss, wieviel Targetmaterial (also Treibstoff) mit einem Laserpuls ablatiert wird. Die Schubmessung wird mit Hilfe einer eigens konstruierten Torsions-

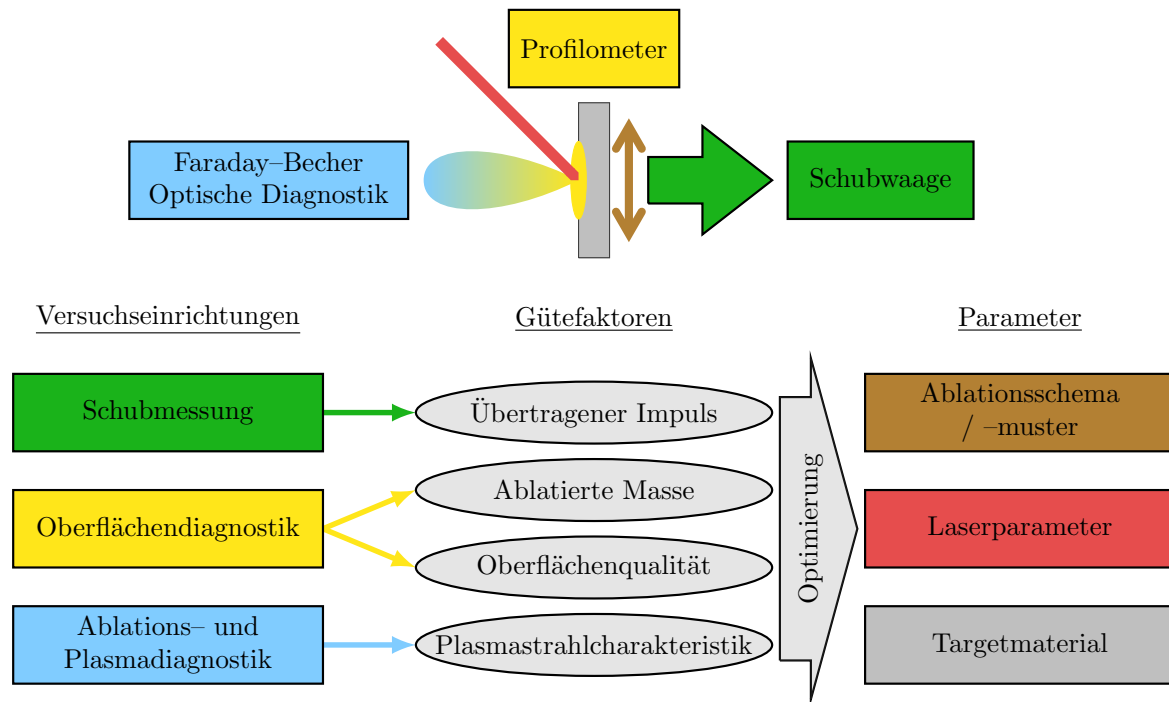


Abbildung 1.3: Gütefaktoren

waage [15] durchgeführt. Durch die so gewonnenen Daten kann rekursiv das Ablationsschema, verschiedene Laserparameter (Wellenlänge, Pulsdauer und -energie) sowie das Targetmaterial optimiert werden.

1.3 Kalibration der Schubwaage

Ein wichtiger Bestandteil bei der Konstruktion und Verwendung eines Messsystems ist die Kalibration. Bei Schubmessungen bedeutet dies, dass eine definierte Kraft erzeugt und auf das System gebracht werden muss. Mit Hilfe dieser Kraft kann nun die Reaktion des Systems analysiert und als Grundlage für die späteren Messungen verwendet werden. Im klassischen Betrieb einer Schubwaage bedeutet dies eine Messung der Auslenkung der Schubwaage bei bekannten Kräften. Wird die Waage später verwendet, um unbekannte Kräfte zu messen, so kann mit Hilfe der Auslenkung ein Rückschluss auf die wirkende Kraft gezogen werden.

Da Mikroantriebe nur sehr kleine Kräfte erzeugen, muss auch die Schubwaage vorher mit kleinen Kräften kalibriert werden. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze. Analog zu dem Konzept der *Gas Proportional Thrusters*, kann die Kalibrationskraft durch Ausströmen eines Gases durch eine Düse erfolgen [16]. Weitere Möglichkeiten sind die Verwendung eines Kalibrationshammers [17, 18], eines elektrostatischen Aktors [16, 18, 19] oder einer kalibrierten Tauchspule als Aktor [20, 21].

Die bisher eingesetzte Methode zur Kalibration der am ITP konstruierten Schubwaage basiert auf der Krafterzeugung mit Hilfe einer Tauchspule [15].

1.4 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Zielsetzung dieser Arbeit ist es, ein auf Photonendruck basierendes Kalibriersystem für die Schubwaage aufzubauen und zu verifizieren. Hierzu sollen zwei ineinander verschachtelte Resonatoren aufgebaut werden, die dasselbe Lasermedium, eine dünne Yb:YAG-Scheibe, verwenden. Der Strahlungsdruck dieser Laser soll zunächst mit einer Mikrowaage untersucht werden, um anschließend eine Kalibration der Schubwaage mit Hilfe des Scheibenlasers durchführen zu können. Abschließend soll diese Kalibriermethode mit dem bisherigen Kalibrationsverfahren mittels Tauchspulen verglichen werden.

Die zum Verständnis der Arbeit erforderlichen Grundlagen werden im folgenden Kapitel 2 erläutert. Hiernach wird in Kapitel 3 die dem experimentellen Aufbau zugrunde liegende Idee sowie deren Umsetzung besprochen. Die Messergebnisse und deren Auswertung werden in Kapitel 4 präsentiert. Eine Analyse der Fehlerquellen dieses Kalibrationsverfahrens sowie ein Vergleich mit der bisherigen Kalibration durch Tauchspulen wird in Kapitel 5 diskutiert. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 6.

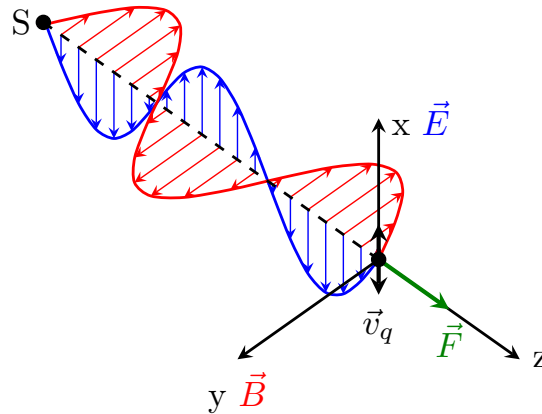


Abbildung 2.1: Wirkung der Lorentzkraft auf eine bewegte Ladung (nach [25])

2 Grundlagen

Zum Verständnis dieser Arbeit sollen zunächst einige Grundlagen erklärt werden. Hierzu gehören sowohl Themen, die zur Auswertung der später akquirierten Daten nötig sind (Strahlungsdruck, Schubwaage), als auch Themen, die als Hintergrundinformationen für die Wahl der verwendeten Komponenten dienen (Scheibenlaser, Relayabbildung).

2.1 Strahlungsdruck

1873 postulierte James Clerk Maxwell in seiner Abhandlung über den Elektromagnetismus, dass mit Materie wechselwirkende elektromagnetische Strahlung auf diese Materie eine Kraft ausübt [22]. Der experimentelle Nachweis des Strahlungsdrucks wurde bereits Anfang des 20. Jahrhunderts zunächst von P. Lebedew [23] und hiernach auch von E. F. Nichols und G. F. Hull [24] erbracht.

Die folgende Erklärung des Strahlungsdrucks ist den “Vorlesungen über Physik” von R. Feynman entnommen [25].

Das Licht, das von einer Quelle S auf eine Ladung q trifft, versetzt diese in eine wellenförmige Bewegung mit der Geschwindigkeit \vec{v}_q (siehe Abbildung 2.1). In diesem Beispiel wollen wir annehmen, dass sich die Strahlung in z -Richtung ausbreitet. Angenommen das elektrische Feld der Strahlung schwingt in x -Richtung, so bewegt sich auch die Ladung entlang der x -Achse. Das Magnetfeld der Strahlung ist orthogonal zum elektrischen Feld

ausgerichtet und schwingt somit in y-Richtung. Aus der Elektrodynamik ist bekannt, dass eine bewegte Ladung in einem Magnetfeld eine Kraft erfährt, die sogenannte Lorentzkraft:

$$\vec{F} = \vec{B} \times \vec{v}_q \cdot q. \quad (2.1)$$

Da es sich hierbei um das Kreuzprodukt des sich in y-Richtung schwingenden magnetischen Feldes mit der in x-Richtung änderlichen Geschwindigkeit der Ladung handelt, ist ersichtlich, dass die resultierende Lorentzkraft in z-Richtung, also entlang der Strahlungsausbreitung, wirkt.

Zur quantitativen Bestimmung des Strahlungsdrucks betrachten wir nun den zeitlichen Mittelwert dieser Kraft $\langle F \rangle$. Da die Stärke des magnetischen Feldes gleich der Stärke des elektrischen Feldes dividiert durch die Lichtgeschwindigkeit c ist, lässt sich unser zeitlicher Mittelwert auch wie folgt schreiben:

$$\langle F \rangle = \frac{q \langle v_q E \rangle}{c}. \quad (2.2)$$

Da aber die Kraft auf eine Ladung, multipliziert mit der Geschwindigkeit, gerade die Arbeit ist, die an dieser Ladung geleistet wird, kann das Zeitmittel der Kraft auch geschrieben werden als

$$\langle F \rangle = \frac{1}{c} \frac{dW}{dt} = \frac{P}{c}. \quad (2.3)$$

Der Impuls, den das Licht liefert, ist demnach gleich der absorbierten Leistung dividiert durch c .

Wird die Strahlung von der Oberfläche reflektiert, so kommt es zusätzlich zu einem Rückstoßimpuls. Licht, dass senkrecht von einem idealen Spiegel reflektiert wird, überträgt demnach die doppelte Kraft. Mit der Reflektivität R der Oberfläche schreiben wir unter der Annahme, dass keine Transmission stattfindet:

$$F_{\text{Str}} = \frac{P}{c}(1 + R). \quad (2.4)$$

Trifft das Licht unter einem Winkel α auf, so teilt sich die übertragene Kraft gemäß des Einfallswinkels in ihre räumlichen Komponenten auf. Die für uns interessante Komponente senkrecht zur Oberfläche kann beschrieben werden durch folgende Formel:

$$F_{\text{Str}, \alpha} = F_{\text{Str}} \cos(\alpha) = \frac{P}{c}(1 + R) \cos(\alpha). \quad (2.5)$$

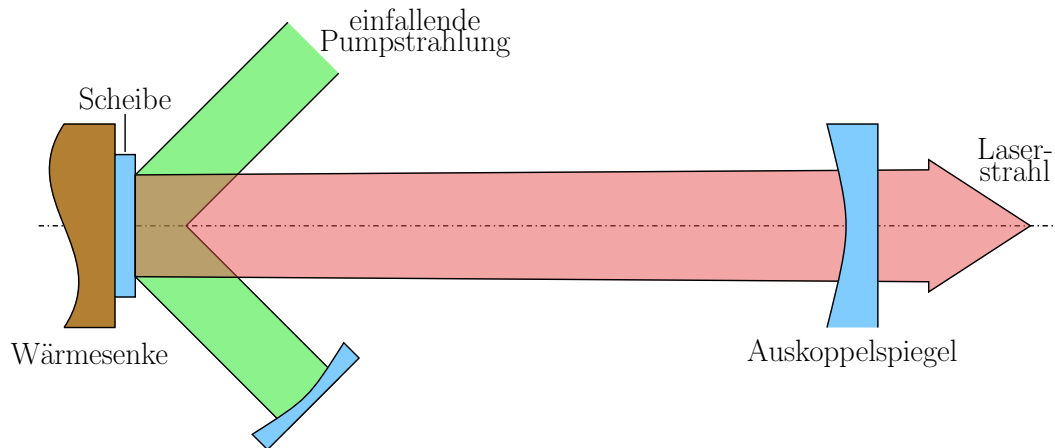


Abbildung 2.2: Prinzipskizze eines axial gepumpten Scheibenlasers (nach [26])

2.2 Scheibenlaser

Bei dem in dieser Arbeit aufgebauten Laser handelt es sich um einen Scheibenlaser, dessen prinzipielle Funktionsweise in Abbildung 2.2 zu sehen ist. Das aktive Medium stellt hierbei eine Scheibe dar, deren Dicke um ein Vielfaches kleiner ist, als der Durchmesser der Pumpstrahlung. Ein großer Vorteil von Scheibenlasern sind die nur sehr schwach ausgeprägten thermischen Linseneffekte. Dies wird dadurch erreicht, dass zum einen möglichst homogene Pumpstrahlung verwendet wird und somit auch die Energiedeposition im Medium gleichverteilt ist. Zum anderen wird die Scheibe vollflächig über eine Wärmesenke auf ihrer Rückseite gekühlt, so dass ein nahezu eindimensionaler axialer Wärmefluss stattfindet [26].

Als aktives Medium wird in dieser Arbeit ein Ytterbium-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat (Yb:YAG) verwendet. Bei Yb:YAG handelt es sich um ein Quasi-3-Niveausystem (siehe Abbildung 2.3). Es unterscheidet sich von dem normalen 3-Niveausystem dadurch, dass es noch einen vierten Zustand gibt (Zustand 1 in der Abbildung). Dieser vierte Zustand liegt energetisch allerdings sehr nahe an der thermischen Energie E_{th} , so dass ein nicht unerheblicher Anteil dieses Zustandes thermisch besetzt ist (etwa 4,6 % bei Raumtemperatur). Da für den Laserbetrieb aber eine Besetzungsinversion nötig ist, bedeutet dies, dass die Schwellpumpleistungsdichte relativ groß ist (etwa $2,1 \frac{kW}{cm^2}$) [27].

Die bevorzugte Pumpwellenlänge von Yb:YAG liegt bei 941,3 nm, die Laserwellenlänge bei 1029,3 nm [26]. Dieses günstige Verhältnis von Pumpphotonenenergie zu Laserphotonenenergie führt zu dem sehr guten theoretisch möglichen Wirkungsgrad von 91 %. Andere diodengepumpte Festkörperlaser weisen hingegen nur Maximalwirkungsgrade von etwa 76 % bis 79 % auf.

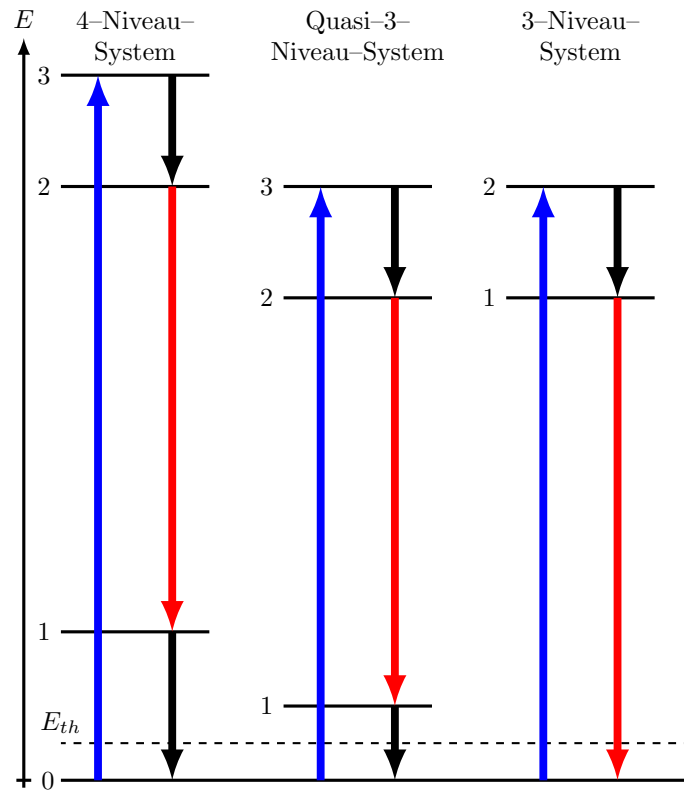


Abbildung 2.3: *Energieniveauschemata* (nach [27])

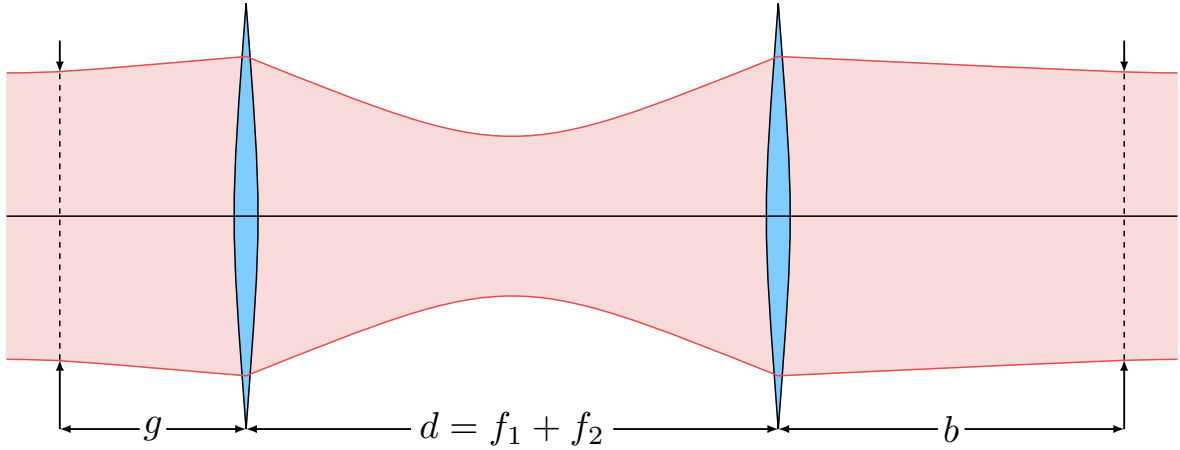


Abbildung 2.4: Prinzip der Relayabbildung

2.3 Relayabbildung

Zur Realisierung eines Lasers, der zum einen eine hohe Stabilität gegenüber Spiegelverkippen aufweist und zum anderen einen Resonatorarm mit einer zuvor gewünschten Länge erlaubt, wurde ein Relayteleskop innerhalb des Resonators integriert.

Abbildung 2.4 zeigt ein optisches System bestehend aus zwei (dünnen) Linsen. Mit Hilfe der Matrizenoptik kann nun der Verlauf eines Strahles durch das optische System berechnet werden. In diesem Fall setzt sich die Systemmatrix wie folgt zusammen:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & f_1 + f_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & g \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Da eine optisch neutrale Abbildung gewünscht ist, sei zunächst gefordert, dass parallele Strahlenbündel in der Eingangsebene auch am Ausgang des Linsensystems weiterhin parallel verlaufen. Diese Forderung bedeutet im $ABCD$ -Formalismus der Matrizenoptik, dass der C -Term gleich Null ist [28].

$$C = \frac{d - f_1 - f_2}{f_1 f_2} \stackrel{!}{=} 0 \quad (2.7)$$

$$\Leftrightarrow d = f_1 + f_2 \quad (2.8)$$

Der Abstand der beiden Linsen muss demnach der Summe der Brennweiten entsprechen. Aus $C = 0$ folgt weiterhin, dass D die Winkelvergrößerung des Systems beschreibt. Betrachtet man sich nun die zusammengefasste Systemmatrix

$$M = \begin{pmatrix} -\frac{f_2}{f_1} & f_1 + f_2 - g\frac{f_2}{f_1} - b\frac{f_1}{f_2} \\ 0 & -\frac{f_1}{f_2} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

und ruft sich zurück in Erinnerung, dass die Optik lediglich den Resonatorarm strecken soll, so ist ersichtlich, dass

$$f_1 = f_2 \quad (2.10)$$

gelten sollte.

Weiterhin ist gefordert, dass Objektebene und Bildebene (respektive die Eingangs- und Ausgangsebene) zueinander konjugiert sind, was im $ABCD$ -Formalismus bedeutet, dass der B -Term gleich Null ist [28]. Aus

$$B = f_1 + f_2 - g \frac{f_2}{f_1} - b \frac{f_1}{f_2} \stackrel{!}{=} 0 \quad (2.11)$$

folgt unter Berücksichtigung der gewünschten Winkelvergrößerung die Abhängigkeit

$$b = f_1 + f_2 - g = 2f - g. \quad (2.12)$$

Weiterhin folgt, dass der Abbildungsmaßstab durch den Term A beschrieben wird und, ebenso wie die Winkelvergrößerung, gleich -1 ist. Die negativen Vorzeichen weisen darauf hin, dass das Bild in der Ausgangsebene auf dem Kopf steht.

Zusammengefasst kann das Relayteleskop beschrieben werden durch:

$$M_{\text{Relay}} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (2.13)$$

2.4 Schubwaage

Bei der in [15] entwickelten Schubwaage, welche mit Hilfe des in dieser Arbeit aufgebauten Lasers kalibriert werden soll, handelt es sich um ein Torsionspendel. Abbildung 2.5 zeigt den Balken der Waage, wie er in den Versuchen verwendet wurde, mit allen wichtigen Komponenten und Größen.

Die in diesem Unterkapitel vorgestellten Gleichungen sind der Veröffentlichung [17] entnommen. In dieser Arbeit wird unter anderem gezeigt, dass sich der Massenschwerpunkt des Balkens möglichst nahe an der Drehachse befinden sollte, um eine bestmögliche Empfindlichkeit zu erreichen. Aus diesem Grund ist bei der verwendeten Schubwaage die Möglichkeit gegeben, an verschiedenen Stellen variable Gegengewichte anzubringen.

Die Dynamik eines solchen Systems kann beschrieben werden durch:

$$\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2 = \frac{f(t)l_{\text{Thruster}}}{I_\theta}. \quad (2.14)$$

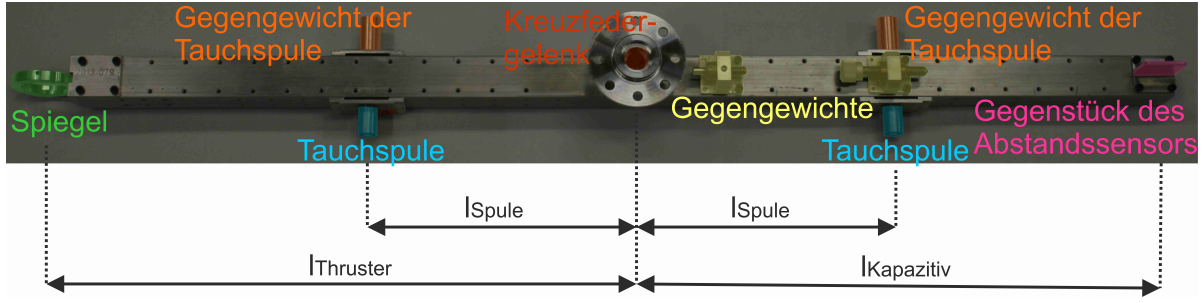


Abbildung 2.5: Balken der Schubwaage

Hierbei ist θ der Auslenkungswinkel des Systems in rad. $f(t)$ ist die zeitabhängige Kraft, die auf den Balken der Waage in einer Entfernung von l_{Thruster} zur Drehachse wirkt. Das System besitzt das Trägheitsmoment I_θ und die Federkonstante k_θ . Hieraus ergibt sich zum einen der Dämpfungskoeffizient

$$\zeta = \frac{\nu}{2} \sqrt{\frac{1}{I_\theta k_\theta}} \quad (2.15)$$

der außerdem noch die Dämpfungskonstante ν enthält. Und zum anderen die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz des Systems:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_\theta}{I_\theta}}. \quad (2.16)$$

Unter der Annahme, dass die Eigenkreisfrequenz, die Dämpfungskonstante und das Trägheitsmoment konstante Größen sind, kann die systembeschreibende Differentialgleichung gelöst werden. Im Fall einer konstant wirkenden Schubkraft ($f(t) = T$) wird Gleichung 2.14 gelöst durch:

$$\theta(t) = \frac{T l_{\text{Thruster}}}{I_\theta \omega_n^2} \left[1 - e^{-\zeta \omega_n t} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \left(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t \right) + \cos \left(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t \right) \right) \right] \quad (2.17)$$

Da eine konstante Kraft verwendet wird, begibt sich das System nach einer bestimmten Zeit in einen stabilen Zustand mit einer festen Winkelauslenkung.

$$\theta(t \rightarrow \infty) = \frac{T l_{\text{Thruster}}}{I_\theta \omega_n^2} = \frac{T l_{\text{Thruster}}}{k_\theta} \quad (2.18)$$

Beziehungsweise kann aus einer sich einstellenden Winkelauslenkung die Kraft ermittelt werden, mit der die Waage belastet wird.

$$T = \frac{\theta k_\theta}{l_{\text{Thruster}}} \quad (2.19)$$

3 Versuchsaufbau

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Herausforderungen die sich bei der Umsetzung des experimentellen Aufbaus ergeben haben. Es wird zunächst erklärt, welche Anforderungen an Intracavity- und Extracavity-Modus gestellt wurden und welche Aufbauten sich hieraus entwickelt haben. Hiernach wird erläutert, wie der Aufbau der beiden Laserresonatoren realisiert wurde, welche Bauteile verwendet wurden und auf welche Besonderheiten zu achten war.

3.1 Resonatordesign

Der Entwurf des in dieser Arbeit aufgebauten Lasers stammt von Dr. Jens Mende (DLR) und ist in Abbildung 3.1 zu sehen. Eine Besonderheit des Resonatordesigns ist, dass zwei Resonatoren in einem Aufbau kombiniert sind und zum Wechsel zwischen diesen beiden Modi lediglich zwei Spiegel aus- bzw. eingebaut werden müssen. Diese beiden Modi werden im folgenden Intracavity- und Extracavity-Modus genannt. Wobei sich im Intracavity-Modus der auf der Waage montierte Spiegel innerhalb des Resonators befindet und im Extracavity-Modus außerhalb. Dieser Spiegel ist in der Abbildung mit S_6 bezeichnet und wird im Experiment dazu verwendet, den Photonendruck zu übertragen. Die in der Abbildung angegebenen Werte auf den Strahlwegen sind die Entfernungen der optischen Komponenten in cm.

3.1.1 Intracavity-Modus

Da die Realisierung des Intracavity-Aufbaus anspruchsvoller ist, wurde dieser als Erstes umgesetzt. An den Resonator im Intracavity-Modus werden zwei maßgebende Anforderungen gestellt:

- Es sollte ein kleiner Grundmoderadius gegeben sein, da dieser einen hohen Multimodebetrieb ermöglicht. Ein Vorteil des Multimodebetriebs ist, dass sich die Moden sehr gut an die Resonatorgeometrie (hier: Apertur des Mediums/Pumpfleck) anpassen. Bei unvermeidlichen, geringfügigen Verkippungen von S_6 sind somit keine großen Leistungsschwankungen zu erwarten. Ein weiterer Vorteil des Multimodebetriebs ist der hohe Wirkungsgrad.
- Um eine weitere Unempfindlichkeit gegenüber Verkippungen von S_6 zu gewährleisten, sollte sich auf diesem Spiegel eine Strahltaile befinden. Dies wird durch Nutzung eines Planspiegels für S_6 erzwungen.

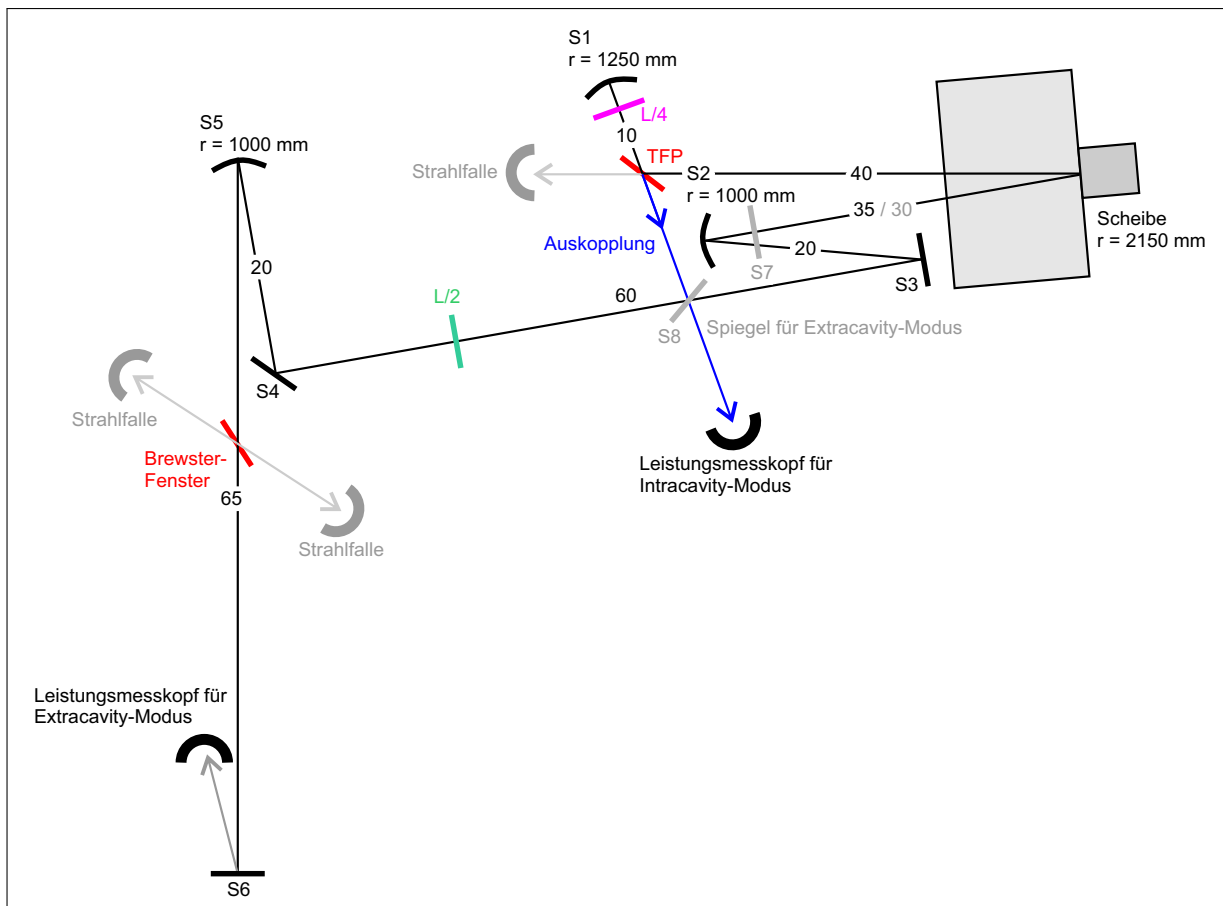


Abbildung 3.1: Skizze der Laserresonatoren

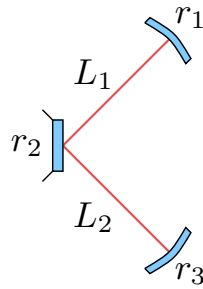


Abbildung 3.2: Skizze des vereinfachten V-Resonators

Neben diesen grundlegenden Anforderungen waren allerdings auch einige Randbedingungen zu beachten, die im Folgenden aufgezählt werden.

- Da der “Waagenspiegel” S_6 einen Endspiegel des Resonators darstellt und somit nicht zur Justierung verwendet werden kann, sollte der andere Endspiegel der Justierung dienen können. Dies wird benötigt, um die Moden gut auf den Pumpfleck abzustimmen. Hieraus ergibt sich, dass die Scheibe als Umlenkspiegel verwendet wird, woraus ein V-förmiger Resonator resultiert (siehe Abbildung 3.2).
- Obwohl ein Vorteil von Scheiben als Lasermedien darin besteht, dass sie nur geringe thermische Linseneffekte aufweisen, so treten diese Effekte bei hohen Leistungen dennoch auf. Die in diesem Versuch verwendete Scheibe hat bei Raumtemperatur eine Brennweite von etwa 1 m. Im Betrieb erwärmt sich die Scheibe und die Brennweite nimmt zu. Bei einer Ausgangsleistung von 1 kW ist mit $\Delta f \approx 10$ cm zu rechnen [29]. Der Laser sollte natürlich für alle Brennweiten der thermischen Linse stabil laufen.
- Der Resonator sollte eine kompakte Bauform haben.

Nach [30] kann jeder Resonator mit einem internen optischen System vereinfacht als ein System bestehend aus zwei gekrümmten Spiegeln (mit den Radien r_1 bzw. r_2), die in einem Abstand (L_1 bzw. L_2) zu einer dünnen Linse (mit Brennweite f) stehen, dargestellt und berechnet werden. Bei unserem Resonator handelt es sich jedoch nicht um eine dünne Linse, sondern um die rückseitig verspiegelte Scheibe (mit dem Radius r_2). Dieser vereinfachte Resonator ist in Abbildung 3.2 skizziert.

Eine Konfiguration nach [30], die alle oben aufgeführten Anforderungen erfüllt, ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Die Länge L_2 kann praktisch natürlich nicht Null sein, sondern muss vielmehr, da sie die Länge zu dem Planspiegel und somit zu dem Spiegel auf der Waage darstellt, eine bestimmte Länge aufweisen. Um diese widersprüchlichen Aussagen zu realisieren, wurde ein Relayteleskop (siehe Abbildung 2.4) in den Resonator eingefügt, das die Scheibe optisch neutral auf den Spiegel S_6 abbildet. Relayabbildungen werden verwendet, um

r_1	r_2	r_3	L_1	L_2
1,25 m	2 m (gegeben)	∞ (gegeben)	0,5 m	0

Tabelle 3.1: Geeignete Parameter für Intracavity-Modus

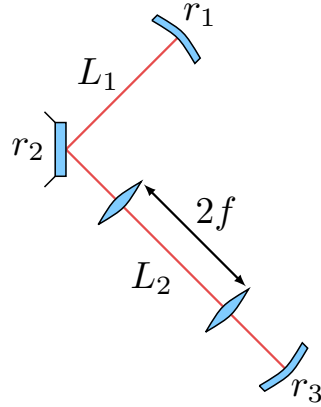


Abbildung 3.3: Skizze des vereinfachten V-Resonators mit integriertem Relayteleskop

nichtlineare Selbstfokussierung durch optische Komponenten zu minimieren [31]. Dadurch gestaltet sich der Resonator schematisch, wie in Abbildung 3.3 dargestellt. Im realen Resonator werden allerdings Spiegel anstelle der Linsen verwendet.

Im Intracavity-Modus befinden sich die Spiegel S_7 und S_8 nicht im Strahlengang. Spiegel S_1 dient als Endspiegel. Der andere Endspiegel ist der auf der Waage befindliche Spiegel S_6 . Der durch den Dünnpolarisator (TFP) ausgekoppelte Strahl trifft direkt auf den Leistungsmesskopf. Zur Ermittlung der an S_6 reflektierten Leistung muss demnach der Auskoppelgrad genau bekannt sein. Der Vorteil des Intracavity-Modus ist, dass sehr hohe Leistungen und somit ein hoher Photonendruck erreicht werden.

Die Simulation des Strahlengangs des Resonators im Intracavity-Modus mit dem Programm *WinABCD* ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Die Strahldurchmesser und Phasenverteilung auf der Scheibe ist identisch mit den jeweiligen Parametern auf dem Spiegel S_6 . Die Spiegel S_2 und S_5 bilden das Relayteleskop und dienen lediglich der Verlängerung des Resonatorarmes. Mit Hilfe dieser Simulation wurde bestimmt, dass der Resonator selbst bei einer Spiegelverkipfung von 2-3 mrad noch stabil läuft.

3.1.2 Extracavity-Modus

An den Resonator für den Extracavity-Modus werden die gleichen Anforderungen gestellt. Die Empfindlichkeit gegenüber Verkipfungen ist im Extracavity-Modus nicht erheblich, da sich der Spiegel S_6 nicht im Resonator befindet. Es wurde trotzdem darauf

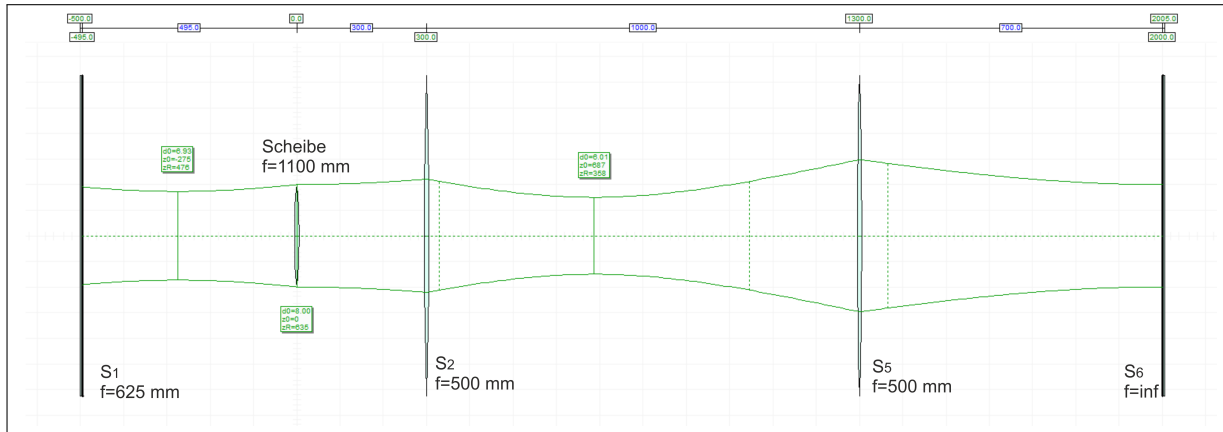


Abbildung 3.4: Simulation des Resonators im Intracavity-Modus

geachtet, einen schmalen Strahldurchmesser auf dem zweiten Endspiegel (in diesem Fall S_7) zu realisieren. Somit entfällt auch das Problem, dass einer der Endspiegel nicht zur Justage verwendet werden kann. Da die Anforderungen an die Stabilität in diesem Modus geringer sind, kann somit die Länge des Resonatorarmes L_2 größer sein (hier $L_2=30$ cm). Aus diesem Grund kann bei diesem Aufbau auf eine Abbildung der Scheibe auf den Endspiegel verzichtet werden. Die Spiegel S_1 und S_5 bilden jedoch auch hier ein Teleskop, das für einen geringen Strahldurchmesser auf Spiegel S_6 sorgt.

Im Extracavity-Modus befinden sich die Spiegel S_7 und S_8 im Aufbau. Die Spiegel S_1 und S_7 stellen die Endspiegel des Resonators dar. Die Auskopplung geschieht (wie auch im Intracavity-Modus) durch den TFP. Spiegel S_8 dient lediglich als Umlenkspiegel. Im Extracavity-Modus wird der “Waagenspiegel” S_6 unter einem leichten Winkel ($\sim 10^\circ$) getroffen und der reflektierte Strahl wird auf das Leistungsmessgerät geleitet. Hierbei ist der Vorteil, dass die auf dem Spiegel auftreffende Leistung direkt messbar ist.

Abbildung 3.5 zeigt den mit dem Programm *WinABCD* simulierten Strahlengang des Resonators im Extracavity-Modus. Da S_1 im realen Aufbau nicht als Auskoppelspiegel fungiert, wurde er in der Simulation als eine Kombination aus Spiegel und dünner Linse modelliert. Die Spiegel S_1 und S_5 bilden ein Kepler-Fernrohr, so dass der Strahldurchmesser auf dem Spiegel S_6 (in der Simulation als Blende angedeutet) nicht zu groß ist.

3.1.3 Polarisationsoptik

Zwei Aufgabenstellungen wurden durch Verwendung von Polarisationsoptiken gelöst. Die eine Aufgabe ist die Auskopplung des Strahles aus dem Resonator, die andere die Einkopplung des Strahles in die Vakuumkammer, in der sich die Schubwaage normalerweise befindet.

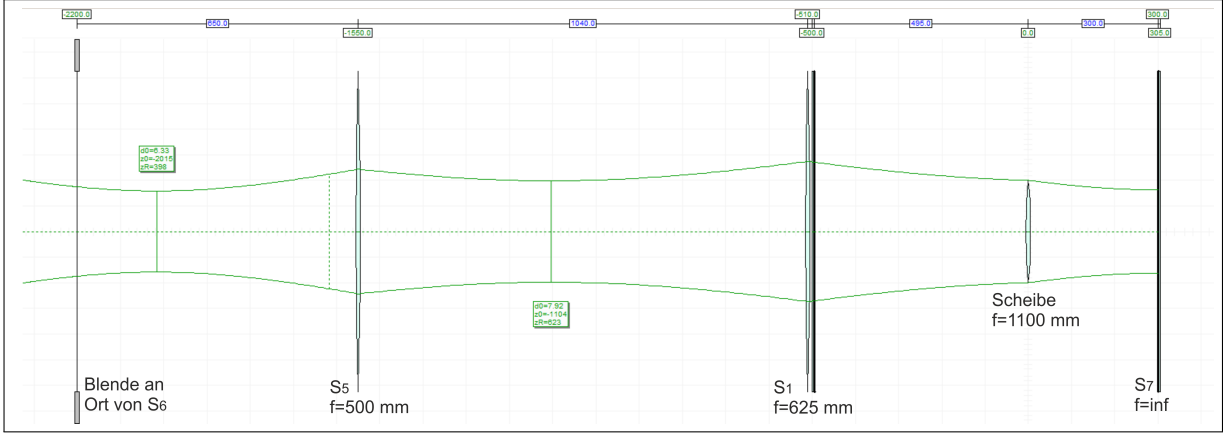


Abbildung 3.5: Simulation des Resonators im Extracavity-Modus

Zur Auskopplung des Strahles aus dem Resonator wird eine Kombination aus einem TFP und einer $\frac{\lambda}{4}$ -Verzögerungsplatte verwendet. Der TFP dient innerhalb des Resonators als Umlenkspiegel. Für senkrecht polarisiertes Licht besitzt der TFP unter einem Winkel von 55° eine hohe Reflektivität, so dass auch nur s-polarisiertes Licht innerhalb des Resonators propagiert. Wird dieses Licht nun am TFP reflektiert, so durchläuft es die $\frac{\lambda}{4}$ -Platte zweimal bevor es wieder auf den TFP trifft. Das vorher ausschließlich s-polarisierte Licht besitzt jetzt auch p-polarisierte Anteile, die durch das TFP transmittieren und aus dem Resonator ausgekoppelt werden.

Die Einkopplung des Strahles in die Vakuumkammer geschieht mit Hilfe einer $\frac{\lambda}{2}$ -Verzögerungsplatte und eines Brewster-Fensters. Stehen der einkommende Strahl und das Brewster-Fenster unter dem Brewster-Winkel, so wird das s-polarisierte Licht des Strahles an der Oberfläche reflektiert und der p-polarisierte Anteil transmittiert. Der Brewster-Winkel kann nach der Formel

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.1)$$

berechnet werden. In diesem Aufbau soll ein Fenster aus Quarzglas mit $n_2 = 1,46$ verwendet werden, so dass sich ein Brewster-Winkel von $55,59^\circ$ ergibt. Befinden wir uns im Extracavity-Modus, so ist der Strahl, der eingekoppelt werden soll, p-polarisiert und die Verwendung der $\frac{\lambda}{2}$ -Platte theoretisch unnötig. Jedoch kann sie hier zur Optimierung der Einkopplung genutzt werden. Befinden wir uns im Intracavity-Modus, so propagiert eigentlich s-polarisiertes Licht innerhalb des Resonators. Mit Hilfe der Verzögerungsplatte kann hier das s-polarisierte Licht in p-polarisiertes Licht umgewandelt werden. Nachdem der Strahl zunächst in die Vakuumkammer eingekoppelt und hiernach wieder ausgekoppelt wird, durchläuft er erneut die $\frac{\lambda}{2}$ -Platte. Das jetzt wieder s-polarisierte Licht kann nun am TFP reflektiert werden und ein neuer Durchlauf beginnt.

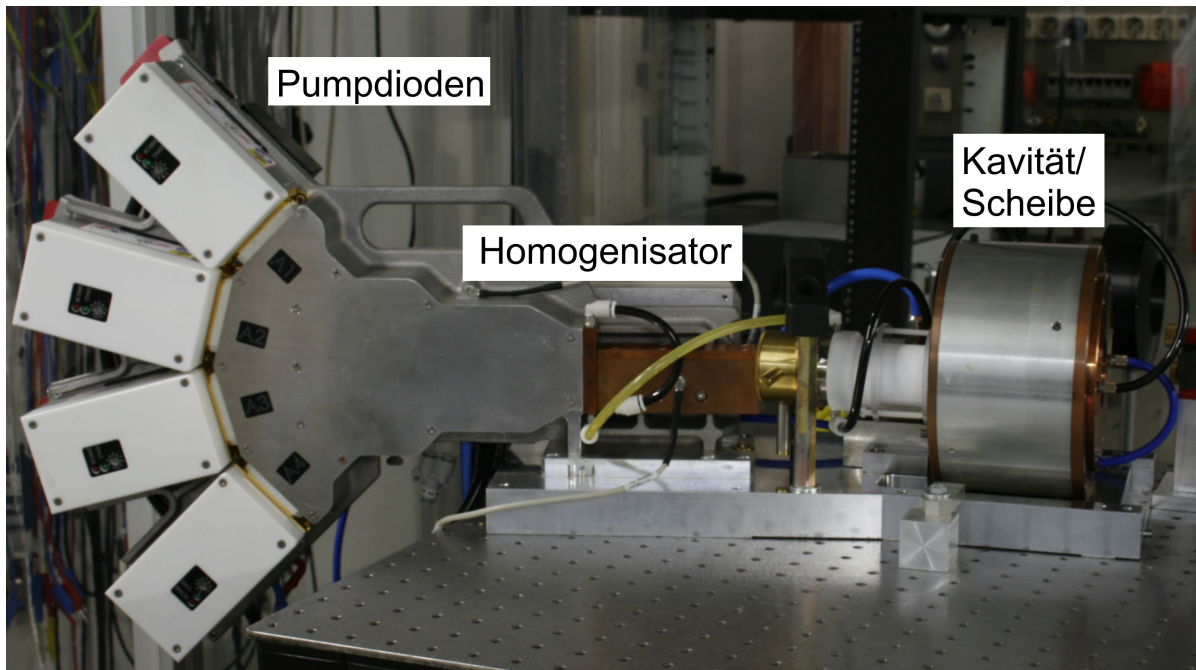


Abbildung 3.6: Foto des Lasermoduls

3.2 Realer Aufbau

Nachdem nun die grundlegenden Ideen hinter der Wahl des experimentellen Aufbaus dargelegt wurden, werden in diesem Kapitel einige Erläuterungen bezüglich des realen Aufbaus folgen.

Die im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Resonatoren wurden zunächst unter einer Flowbox realisiert, die durch ihre laminare Strömung den optischen Tisch und die darauf befindlichen Bauteile von Staub und anderen Verschmutzungen frei hält. Da die beiden Waagen für sehr geringe Kräfte ausgelegt sind, müssen diese innerhalb der Flowbox durch eine Einhausung von der erzeugten Luftstömung geschützt werden. Die Schubwaage befindet sich also nicht an ihrem eigentlichen Einsatzort, innerhalb einer Vakuumkammer, und auch die Einkopplung in die Vakuumkammer mittels Brewster-Fenster wurde aus diesem Grund noch nicht in den experimentellen Aufbau integriert.

Kernstück des Aufbaus stellt das Lasermodul dar, welches in Abbildung 3.6 zu sehen ist und sich prinzipiell aus vier Elementen zusammensetzt. Eines der Elemente sind die vier Laserdioden, die bei einer Wellenlänge von $941,3\text{ nm}$ emittieren und als Pumpquelle dienen. Die Pumpleistung darf hierbei einen Wert von $1,8\text{ kW}$ nicht überschreiten. Im Homogenisator wird hiernach ein homogenes Pumpprofil erzeugt. Die Kavität leitet die Pumpstrahlung 16 mal durch das aktive Medium. Bei der Scheibe selbst handelt es sich um einen YAG-Kristall, der mit 11% Ytterbium dotiert ist. Sie besitzt eine Dicke von $140\text{ }\mu\text{m}$ und einen Durchmesser von 14 mm . Der erzeugte Pumpfleck hat einen Durchmes-

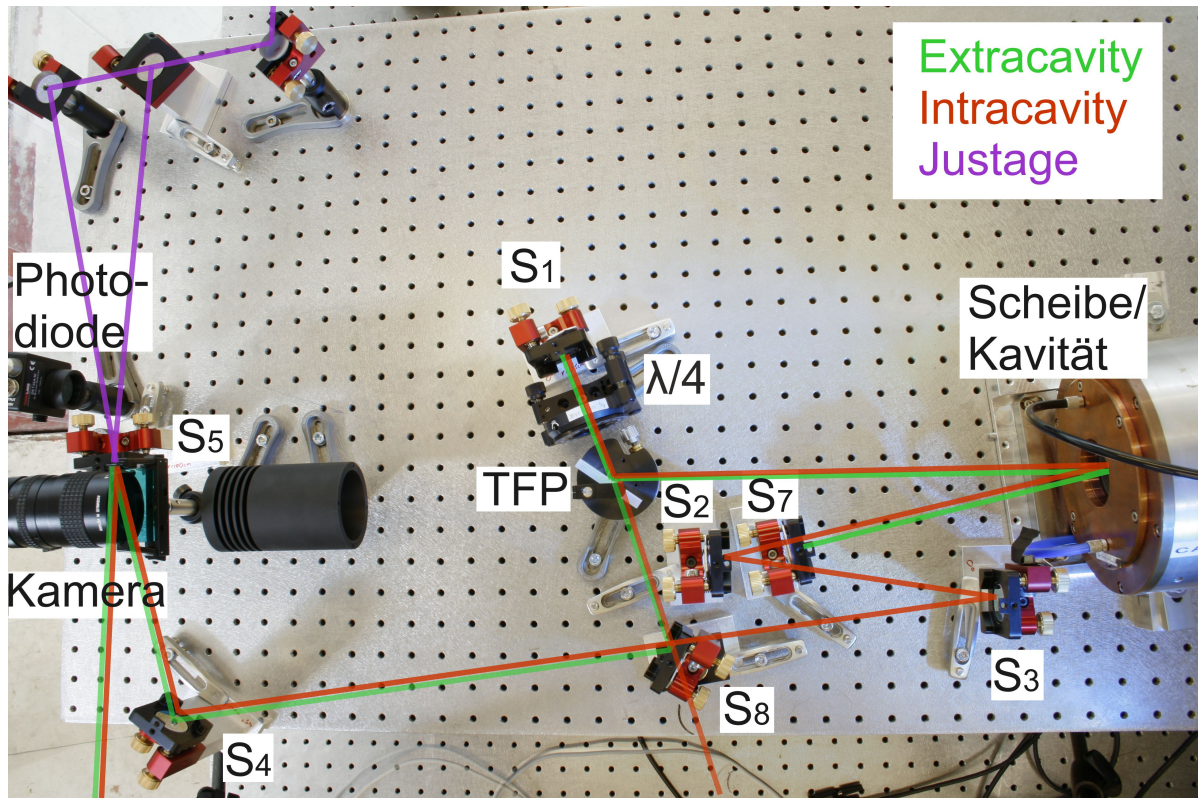


Abbildung 3.7: Foto des experimentellen Aufbaus

ser von 8,3 mm. Der Krümmungsradius der eingesetzten Scheibe variiert von 1,96 m bis 2,13 m für Pumpleistungen bis zu 1,8 kW. Die Scheibe ist auf der einen Seite ganzflächig auf einen Diamanten aufgeklebt, welcher auch als Wärmesenke dient. Alle aufgezählten Elemente des Lasersmoduls sind wassergekühlt.

Der vordere Teil des Lasersmoduls ist auch in Abbildung 3.7 zu sehen, welches einen Großteil der aufgebauten Resonatoren zeigt. Die Strahlen, die in der linken unteren Ecke aus dem Bild laufen, führen in eine Einhausung bzw. zu den Waagen. Ansonsten ist der Aufbau analog zu dem, der in der Skizze in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Zur Vermeidung von ungewünschten Reflexionen sind neben den Spiegeln auch die Bauteile der Polarisationsoptik schwenk- und neigbar montiert. Des Weiteren ist in der Abbildung die Einkopplung des Justagelaserstrahls zu sehen. Da es sich bei dem Justagelaser um einen HeNe-Laser mit $\lambda = 632 \text{ nm}$ handelt und die Reflektivität der Laserspiegel in diesem Bereich nur etwa 50 % beträgt, kann der Justagestrahl in beide Richtungen (Waage und Scheibe) eingekoppelt werden.

Zwei weitere Bauteile, die auf Abbildung 3.7 zu sehen sind und bis jetzt noch nicht diskutiert wurden, gehören zum Sicherheitskonzept bei der Verwendung des Lasersmoduls. Zum einen ist dies eine Photodiode, die Teil der Fluoreszenzabschaltung ist. Wird einer Scheibe zu viel Energie zugeführt und zu wenig abgeführt, so wird sie zerstört. Dies

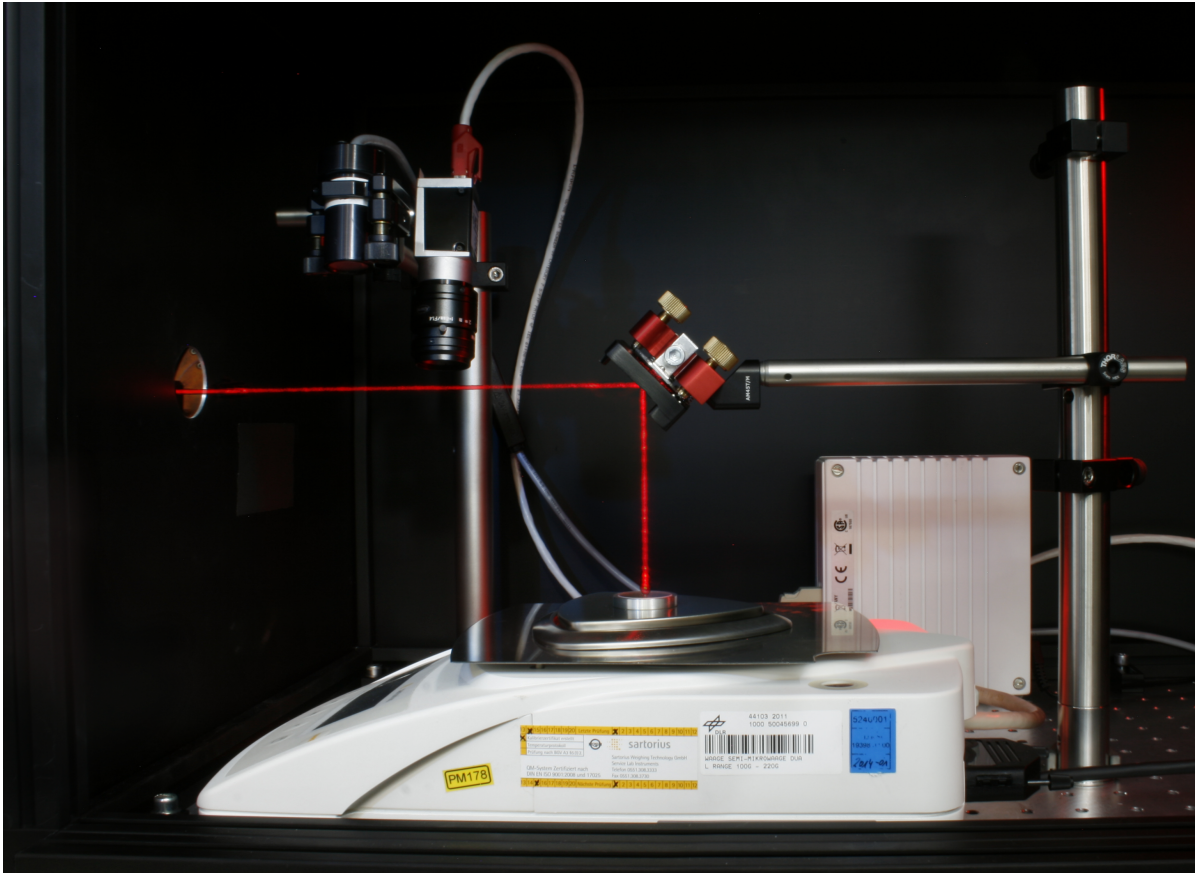


Abbildung 3.8: Foto der Analysewaage im Aufbau

geht mit einer erhöhten Fluoreszenz der Scheibe einher. Die abgebildete Photodiode ist mit einer Elektronik verbunden, die den Strom der Laserdioden unterbricht, wenn ein zuvor eingestelltes Limit überschritten wird. Um eine Sättigung der Photodiode durch IR-Strahlung zu verhindern, wird ein NIR-Sperrfilter verwendet.

Außerdem befindet sich im Aufbau noch eine Kamera, welche auch einen vorgeschalteten NIR-Sperrfilter besitzt. Das Kamerabild bietet zum einen durch Justage die Möglichkeit, die anschwingenden Moden in Übereinstimmung mit dem Pumpfleck zu bringen. Zum anderen dient sie der optischen Überwachung der Scheibe. Treten zum Beispiel Defekte auf der Scheibe auf, so können sie auf dem Kamerabild erkannt werden. Auch für eine anfängliche Einstellung der Lage der Kavität bezüglich der Scheibe ist das Bild der Kamera notwendig.

In Abbildung 3.8 ist die Analysewaage in der Einhausung zu sehen. Bei dem Spiegelhalter auf der Waage handelt es sich um eine “Schale” aus Aluminium, die auf die Waagschale geklebt ist. Das CAD-Modell des konstruierten Spiegelhalters ist in Abbildung 3.9 a) zu sehen. Das Ablesen der Daten geschieht mit einer Kamera, die auch auf der Abbildung zu sehen ist. Es ist zu beachten, dass es sich bei dem gezeigten Aufbau

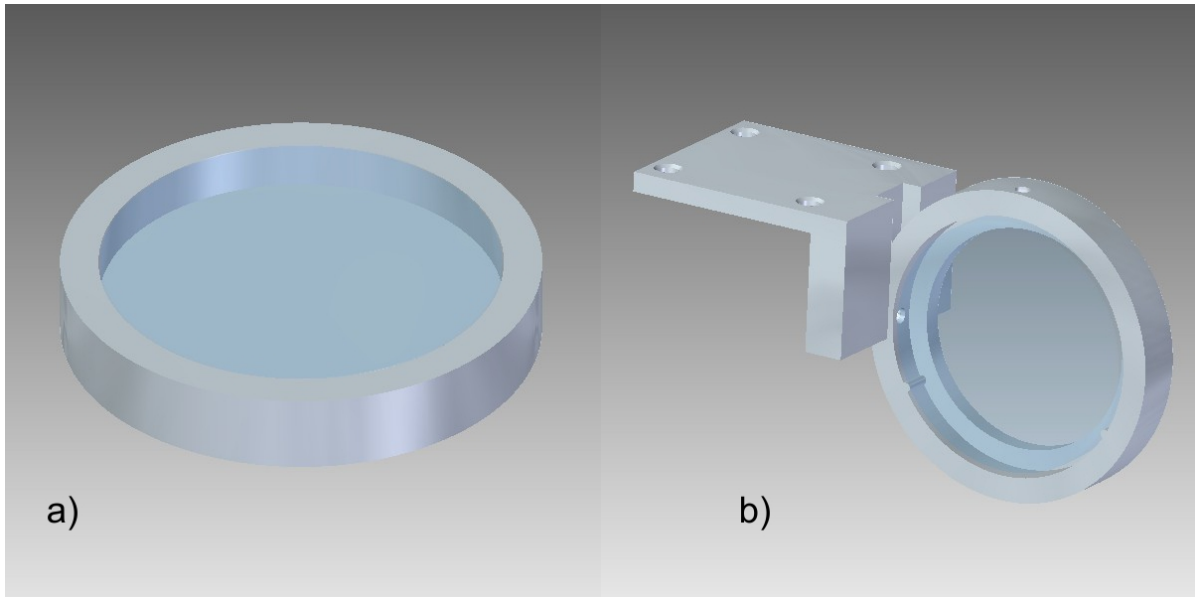


Abbildung 3.9: CAD-Modelle der konstruierten Spiegelhalter (a: Analysewaage; b: Schubwaage)

um den Intracavity-Modus handelt, da der Strahl senkrecht auf den Spiegel trifft und somit in sich selbst zurück reflektiert wird.

Abbildung 3.10 zeigt die Schubwaage in der Einhausung. Im Gegensatz zu vorherigem Foto ist diesmal der Extracavity-Modus aufgebaut, bei dem der eintreffende Strahl unter einem Winkel auf den Spiegel trifft und hiernach auf den Leistungsmesskopf geleitet wird. Das Foto zeigt den Spiegel, der zur Kraftübertragung genutzt wird. Rechts neben dem Spiegel befindet sich die Tauchspule 1, mit der im Closed-Loop-Betrieb eine dem Strahlungsdruck entgegenwirkende Kraft erzeugt werden kann. Im Open-Loop-Betrieb kann sie genutzt werden, um eine aktive Dämpfung zu implementieren, so dass die finale Winkelauslenkung schneller erreicht wird. Tauchspule 2 ist während der Messungen inaktiv, kann aber, da die Kraft in die gleiche Richtung wirkt wie der aufgebrachte Photonendruck, zur Aufbringung einer Referenzkraft verwendet werden. Am rechten Rand der Schubwaage befindet sich der kapazitive Entfernungssensor, mit dessen Hilfe im Open-Loop-Betrieb auf die Winkelauslenkung geschlossen werden kann. Im Closed-Loop-Betrieb wird er als Regelgröße verwendet und auf einem konstanten Wert gehalten. Die beiden unbeschrifteten Bauteile in der Abbildung (zwischen Spiegel und Spule 1 bzw. Spule 2 und kapazitivem Entfernungssensor) sind manuelle Sperren, die eine übermäßige Auslenkung der Waage im Falle einer Fehlfunktion verhindern.

Das CAD-Modell des Spiegelhalters für die Montage an der Schubwaage ist in Abbildung 3.9 b) zu sehen. Bei der Konstruktion des Spiegelhalters wurde darauf geachtet, dass die Rückseite des Spiegels frei zugänglich ist. Dies verhindert thermische Störeinflüsse, die durch Erwärmung des Balkens auftreten könnten. Außerdem bietet es durch Verwendung

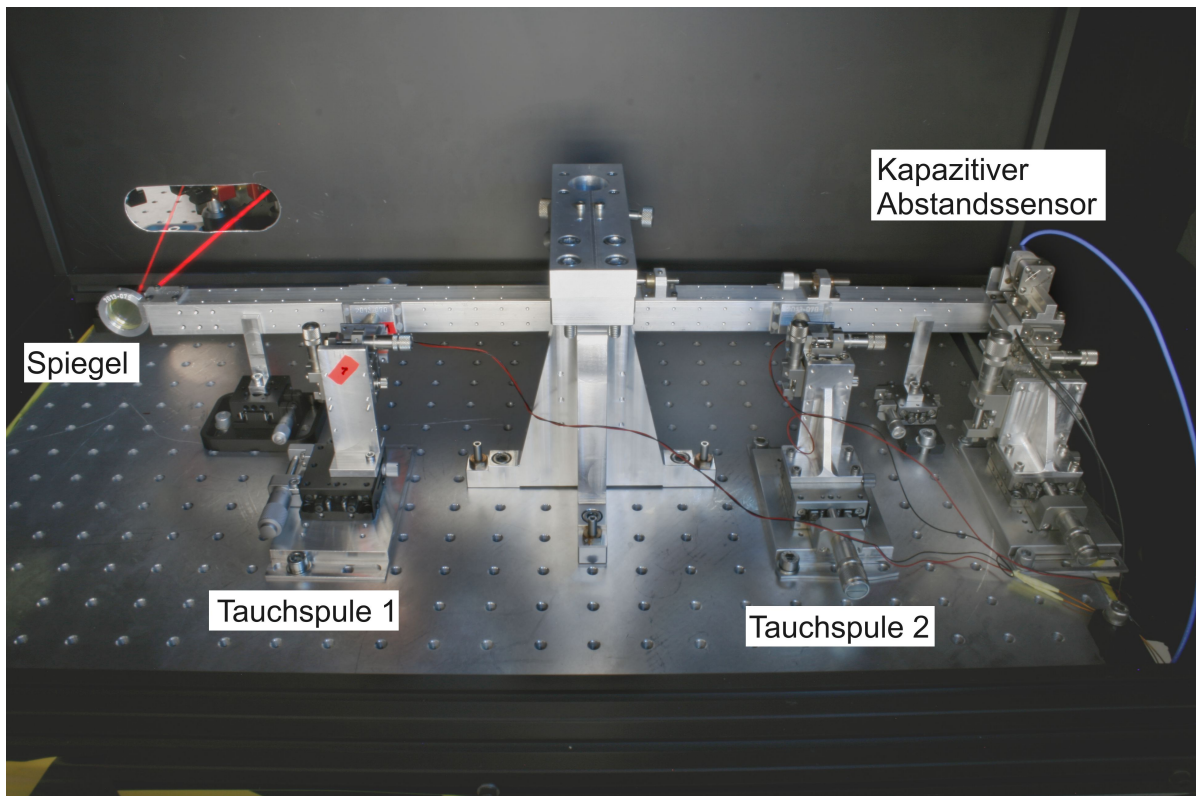


Abbildung 3.10: Foto der Schubwaage im Aufbau

einer Photodiode die Möglichkeit, Unregelmäßigkeiten in der Laserleistung zu ermitteln, die aufgrund der Trägheit der thermischen Leistungsmessung ansonsten nicht registriert würden.

In all den Abbildungen nicht zu sehen, ist der Leistungsmesskopf. Verwendet wird das wassergekühlte Modell *L1500W* des Herstellers *Ophir*. Er besitzt eine Apertur von 50 mm und kann Leistungen von 15 W bis 1500 W mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$ messen. Es ist darauf zu achten, dass der zu messende Strahl zentral auf dem Messkopf auftrifft und nicht größer ist, als der Ring aus Thermoelementen, die für die Messung der Leistung verwendet werden. Er darf allerdings auch nicht so klein sein, dass die maximale Leistungsdichte der absorbierenden Oberfläche überschritten wird. Eine Aufweitung mittels Zerstreuungslinse ist in den meisten Fällen vorzunehmen.

4 Messungen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Aufnahme und der Auswertung der Messdaten. Zunächst wird der Auskoppelgrad des Lasers bestimmt. Es folgt eine Abschätzung der erreichbaren Leistungen und Kräfte. Hiernach wird eine erste Validierung des Messkonzeptes mit Hilfe einer kommerziellen Mikrowaage durchgeführt. Für die Auswertung der Messungen mit der Schubwaage wird zunächst die Federkonstante des Kreuzfedergelenks bestimmt und eine Kalibration der verwendeten Tauchspulen durchgeführt. Hiernach folgt im Open-Loop-Betrieb ein Vergleich der durch Strahlungsdruck aufgebrachten Kraft mit der theoretisch benötigten Kraft für die gemessene Auslenkung der Waage. Im Closed-Loop-Betrieb werden die aufgebrachten Drehmomente durch die Laserstrahlung und durch die Tauchspule betrachtet. Anschließend werden Messergebnisse und Problematiken aus den Messungen im Extracavity-Modus vorgestellt.

4.1 Auskoppelgrad

Ein wichtiger Punkt bei der Auswertung der Messdaten im Intracavity-Modus ist die Leistung innerhalb des Resonators. Da die Leistung nur außerhalb des Resonators gemessen werden kann, muss zur Berechnung der internen Leistung der Auskoppelgrad bekannt sein. Wie bereits erwähnt, findet die Auskopplung des aufgebauten Lasers mit Hilfe einer Polarisationsoptik, bestehend aus einem TFP und einer $\frac{\lambda}{4}$ -Verzögerungsplatte, statt. Ein Vorteil der Strahlauskopplung mittels Polarisationsoptik ist, dass der Auskoppelgrad durch Drehung der Verzögerungsplatte kontinuierlich variiert werden kann. Zur Bestimmung eines numerischen Wertes des Auskoppelgrads müssen allerdings Vergleichsmessungen mit einem Spiegel mit bekannter Transmissivität durchgeführt werden.

Aus diesem Grund wurde zunächst die Transmissivität eines vorhandenen Auskoppelspiegels gemessen. Laut Angaben des Herstellers *Layertec* weist die Vorderseite des Spiegels eine Reflexivität von $97 \pm 0,6\%$ auf. Die Rückseite ist antireflexbeschichtet und reflektiert $< 0,15\%$ des einkommenden Strahls. Zur Messung der Transmissivität wurde der aufgebaute Laser verwendet. Hierzu wurde die Leistung des ausgekoppelten Strahls einmal ohne Spiegel gemessen (P_{out}) und ein zweites Mal nach Transmission durch den Auskoppelspiegel (P_{trans}). Zur Messung von P_{out} wurde ein Leistungsmesskopf des Typs *L1500W* benutzt, die transmittierte Leistung wurde mit einem Messkopf des Typs *FL300A* gemessen. Beide Messgeräte stammen von dem Hersteller *Ophir*. Die Messwerte sowie die daraus resultierenden Auskoppelgrade ($\frac{P_{\text{trans}}}{P_{\text{out}}}$) sind in 4.1 zu sehen.

Mit der Kenntnis des Verhaltens des Auskoppelspiegels wurde hiernach die Verzöge-

I [A]	P_{out} [W]	P_{trans} [W]	Auskoppelgrad [%]
18	14,9	0,37	2,48
19	33,8	0,83	2,46
20	54,2	1,30	2,40
21	77,7	1,92	2,47
22	98,4	2,47	2,51

Tabelle 4.1: Messwerte zur Bestimmung der Transmissivität des Auskoppelspiegels

I [A]	P_{EC} [W]
18	14,9
19	35,4
20	59,9
21	82,9
22	107,6
23	131,8
24	156,6
25	183,5
26	207,8
27	233,4
28	260,4
29	286,4
30	314,0

Tabelle 4.2: Ausgangsleistung in Abhängigkeit des Diodenstroms

rungsplatte so eingestellt, dass die Auskopplung durch den TFP mit der Auskopplung durch den Auskoppelspiegel möglichst identisch ist. Hierzu wurde der Auskoppelspiegel anstelle des Endspiegels S_6 eingesetzt und die Ausgangsleistungen sowohl hinter diesem Spiegel als auch hinter dem TFP parallel gemessen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde ein Auskoppelgrad von 2,4 % angenommen. Eine Abschätzung der Leistung innerhalb des Resonators P_{int} kann nun mit Hilfe der Transmissivität T des TFP, also dem Auskoppelgrad, und der außerhalb des Resonators gemessenen Leistung P_{ext} nach folgender Formel erfolgen:

$$P_{\text{int}} = P_{\text{ext}} \cdot \frac{1 - T}{T}. \quad (4.1)$$

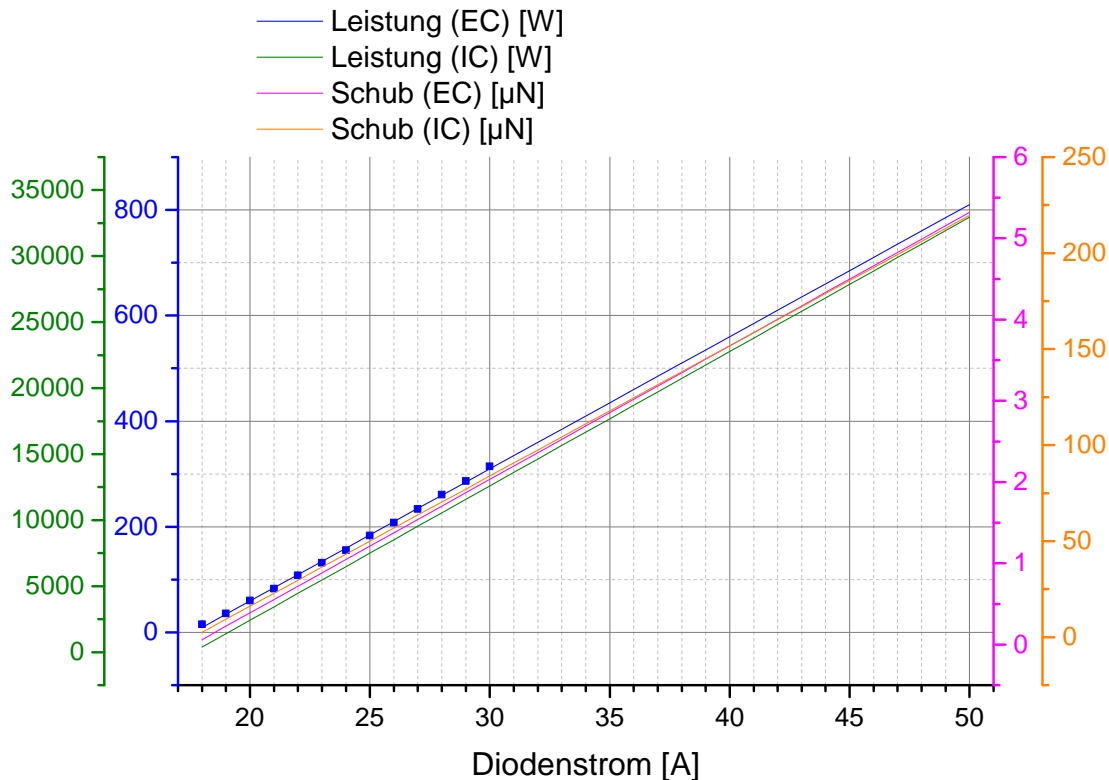


Abbildung 4.1: Abschätzung der erzielbaren Leistungen und Schubkräfte im Extracavity- und Intracavity-Modus

4.2 Laserleistung

Zur Auslegung des Systems muss bekannt sein, in welcher Größenordnung sich die Messgröße befindet. Hierzu wurde zunächst eine Leistungsmessung durchgeführt. Tabelle 4.2 zeigt die hierbei ermittelten Leistungswerte außerhalb des Resonators in Abhängigkeit des Pumpdiodenstroms.

Zur gefahrenlosen Ermittlung der maximal erzielbaren Leistungen bei einem Auskoppelgrad von 2,4% wurde aus den Daten zunächst eine lineare Ausgleichsgerade ermittelt. Anhand der so gewonnenen Funktion kann unter Zuhilfenahme der maximal möglichen Stromstärke des Netzteils eine Abschätzung bezüglich der erzielbaren Leistungen und Kräfte erstellt werden. In Abbildung 4.1 sind die so ermittelten Geraden sowohl für den Intracavity- als auch für den Extracavity-Modus dargestellt.

Es ist zu sehen, dass eine Ausgangsleistung des Lasers von 15 W bis 800 W zu erwarten ist. Unter der Annahme, dass der ausgekoppelte Strahl an einem Spiegel mit $R=99,98\%$ reflektiert wird und unter einem Winkel von 10° auf den Spiegel trifft, ergibt sich nach Formel 2.5 eine senkrecht zur Spiegelebene übertragene Kraft von $0,1 \mu\text{N}$ bis $5,5 \mu\text{N}$.

Die Leistung innerhalb des Resonators kann mit Hilfe des ermittelten Auskoppelgrades bestimmt werden; es ergeben sich Leistungswerte von 0,4 kW bis 33 kW. Da uns der Strahlungsdruck auf einem der Endspiegel interessiert und der Laserstrahl somit nicht unter einem Winkel auf den Spiegel trifft, wirkt diesmal die gesamte Kraft senkrecht zur Spiegelebene. Zu erwarten ist somit eine Schubkraft von $2,5 \mu\text{N}$ bis $220 \mu\text{N}$.

4.3 Messungen mit Analysewaage

Zunächst soll überprüft werden, ob der theoretische Zusammenhang zwischen Laserleistung und übertragener Kraft mit einem kalibrierten System gezeigt werden kann. Hierzu wurde die kommerzielle Analysewaage *CPA225D* des Herstellers *Sartorius* verwendet. Der Wägebereich der Waage umfasst 220 g und ist in 3 Bereiche unterteilt. In dem für uns interessanten Bereich, bei einer Belastung der Waage von weniger als 40 g, bietet die Waage eine Ablesbarkeit von 0,01 mg bei einer Reproduzierbarkeit (Standardabweichung) von $\leq \pm 0,02 \text{ mg}$. Dies entspricht einer Ablesbarkeit von etwa $100 \mu\text{N}$ mit einer Abweichung von etwa $200 \mu\text{N}$. Es ist zu beachten, dass die Einschwingzeit der Waage laut Hersteller 6 s beträgt.

Im Extracavity-Modus ist maximal mit Leistungen von 800 W zu rechnen. Diese maximale Leistung führt unter Berücksichtigung der Reflektivität des Spiegels und des Winkels des einfallenden Strahles zu einem maximalen Schub von etwa $5,3 \mu\text{N}$. Hieraus ergibt sich mit $F = ma$ und $a = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ein messbares Gewicht von $0,5 \mu\text{g}$. Aus diesem Grund wurden nur Messungen im Intracavity-Modus durchgeführt; die erreichbaren Leistungen und Kräfte sind bei gleicher Pumpleistung um etwa das Vierzigfache größer.

Die Leistungsmessung, die parallel zur Schubmessung durchgeführt wird, geschieht mit dem thermischen Leistungsmesskopf *L1500W* des Herstellers *Ophir*. Der kalibrierte Leistungsmesskopf kann Leistungen von 15 W bis 1500 W mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \%$ messen. Aufgrund der Trägheit des Messprinzips ist auch die Leistungsmessung nicht instantan. Der Hersteller gibt an, dass nach 2,7 s erst 95 % der eingestrahlt Leistung angezeigt werden.

Abbildung 4.2 zeigt den berechneten Schub in Abhängigkeit des Diodenstroms. Gemessen wurden hier in beiden Messreihen jeweils, wie oben beschrieben, die ausgekoppelte Leistung sowie die Kraft. Aus der ausgekoppelten Leistung wurde mit Hilfe des Auskoppelgrades die Leistung innerhalb des Resonators bestimmt und nach Formel 2.4 die theoretisch auf den Spiegel übertragene Kraft ermittelt. Das zeitgleich gemessene Gewicht wurde mit der bekannten Formel $F = ma$ in die zugehörige Kraft umgerechnet.

Die Abbildung zeigt deutlich, dass die theoretischen Schubwerte, die über die Leistungsmessung ermittelt wurden, in beiden Messungen übereinstimmen und einen linearen Verlauf besitzen. Die mit steigender Pumpleistung ebenfalls ansteigenden Fehlerbalken sind bedingt durch den prozentualen Fehler der Energiemessung. Die (kaum sichtbaren)

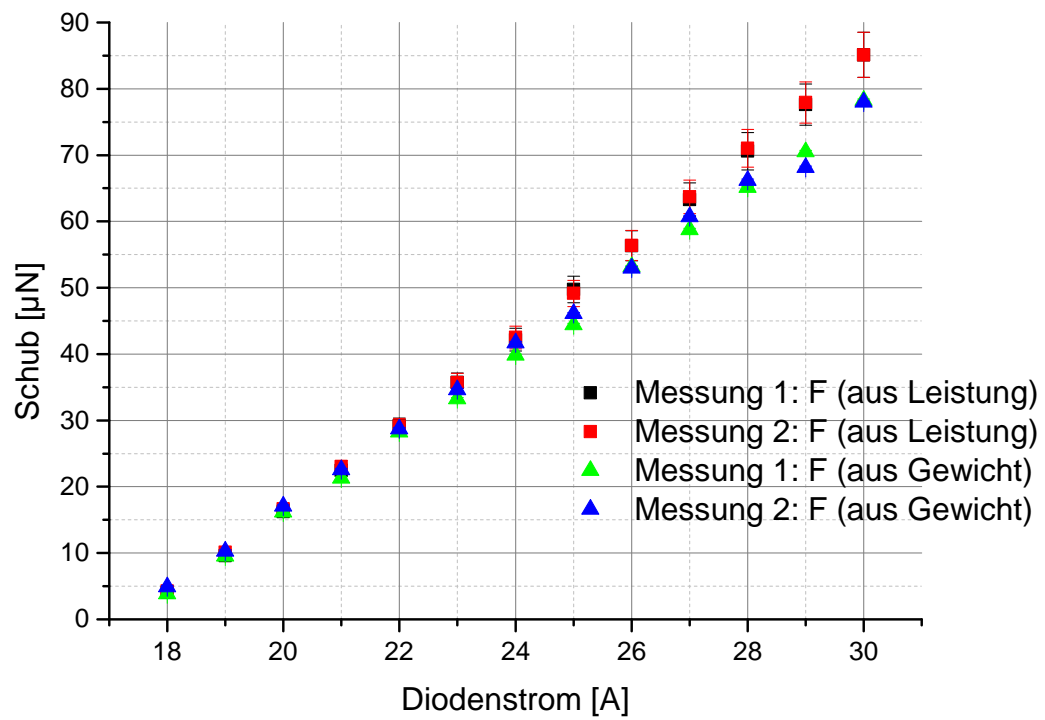


Abbildung 4.2: Schubkraft in Abhängigkeit des Diodenstroms

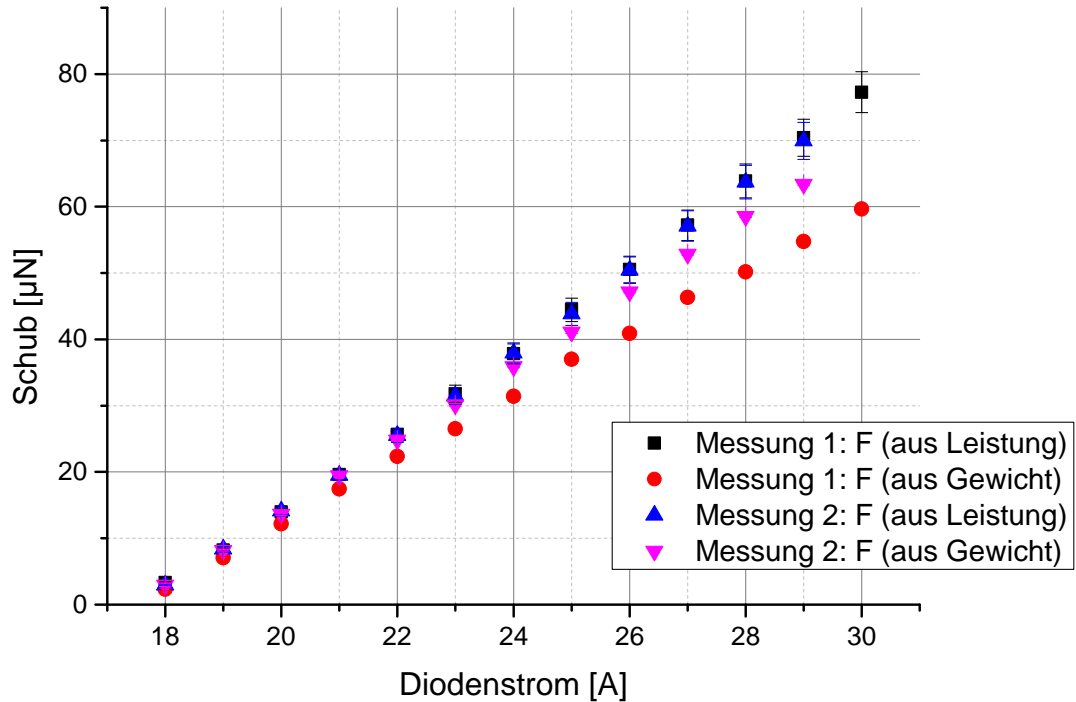


Abbildung 4.3: Schubkraft in Abhängigkeit des Diodenstroms bei kurzer und längerer Strahlzeit

konstanten Fehlerbalken bei den Gewichtskräften berücksichtigen die Standardabweichung der Analysewaage.

Bei Betrachtung der Gewichtskräfte stellt man fest, dass die Messwerte bei geringen Leistungen sehr gut mit den theoretischen Werten übereinstimmen. Bei höheren Leistungen hingegen ist das gemessene Gewicht immer zu niedrig. Des Weiteren konnte während der Messung beobachtet werden, dass sich mit steigender Leistung ein negativer Offset gebildet hat. Dieser Offset verschwand nach einiger Zeit, so dass anzunehmen war, dass es sich um ein thermisches Problem handelt.

Aus diesem Grund wurde eine weitere Messreihe aufgezeichnet, die in Abbildung 4.3 zu sehen ist. Die Werte in Messung 1 wurden abgelesen nachdem der Laser etwa eine Minute bei der eingestellten Leistung betrieben wurde. Bei Messung 2 hingegen wurden die Werte abgelesen sobald die Waage einen stabilen Zustand erreicht hatte und anschließend auf den nächsten Leistungswert gewechselt. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine längere Bestrahlungsdauer die gemessene Kraft herunter setzt. Dementsprechend größer ist bei längerer Bestrahlungsdauer auch der negative Offset nach dem Ausschalten des Lasers.

Mit dem Pyrometer 457 der Firma *Fluke* konnte festgestellt werden, dass eine Temperaturerhöhung der Waagschale um 2,5 K zu einem Offset von etwa -1 mg führt. Nimmt man an, dass die Leistung innerhalb des Resonators 10 kW beträgt und der Spiegel eine Transmission von 0,02 % besitzt, so ergibt sich eine transmittierte Leistung von 2 W. Da die verwendeten Spiegel auf der Vorderseite eine hochreflektive Schicht und auf der Rückseite eine Antireflexbeschichtung besitzen, ist davon auszugehen, dass ein großer Teil der transmittierten Leistung auch in Wärme umgewandelt wird. Nimmt man weiterhin an, dass Spiegelhalter und Waagschale eine Masse von 10 g besitzen und setzt für die spezifische Wärmekapazität c einen Literaturwert für Aluminium ein, so kann berechnet werden, wie lange der Laser auf den Spiegel einstrahlen muss, um eine Temperaturänderung von 2,5 K bzw. einen Offset von -1 mg zu erzeugen.

$$t = \frac{\Delta T m c}{P} = \frac{2,5 \text{ K} \cdot 0,01 \text{ kg} \cdot 897 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}{2 \text{ W}} = 11,2 \text{ s} \quad (4.2)$$

Selbst bei einem relativ geringen Diodenstrom ($I \approx 25 \text{ A}$) und einer Strahlzeit, die in derselben Größenordnung ist, wie die typische Einschwingzeit der Waage, ergeben sich also erhebliche Störeinflüsse.

4.4 Federkonstante

Zur genauen Verifizierung der aufgebrachten Schubkraft ist es im Open-Loop-Betrieb essentiell, den genauen Wert der Federkonstante zu kennen. Da der Hersteller die Federkonstante mit einer hohen Ungenauigkeit von $\pm 10\%$ angibt, soll sie mit Hilfe von Messungen selbst bestimmt werden. In Abbildung 4.4 ist deshalb ein Ausschnitt einer Messung dargestellt, bei dem die Schubwaage nach einem anfänglichen Impuls eine freie Schwingung vollführt hat. Mit dem Programm *Origin* wurde ein Fit dieser gedämpften Schwingung berechnet, um einzelne benötigte Parameter zu erhalten. Ein Plot der Fitfunktion sowie die berechnete Fitfunktion mit sämtlichen Parametern sind auch in der Abbildung zu sehen.

Aus der Schwingungslehre ist bekannt, dass die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz ω_n aus der gedämpften Eigenkreisfrequenz ω_D und der Abklingkonstante χ berechnet werden kann. Diese beiden Größen können dem Fit der Messung entnommen werden, so dass sich die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz berechnet zu:

$$\omega_n = \sqrt{\omega_D^2 + \chi^2} = 4,528 \text{ s}^{-1}. \quad (4.3)$$

Eine weitere wichtige Größe, die benötigt wird, ist das Inertialmoment des Balkens der Waage senkrecht zur Drehachse. Das Inertialmoment kann mit Hilfe des CAD-

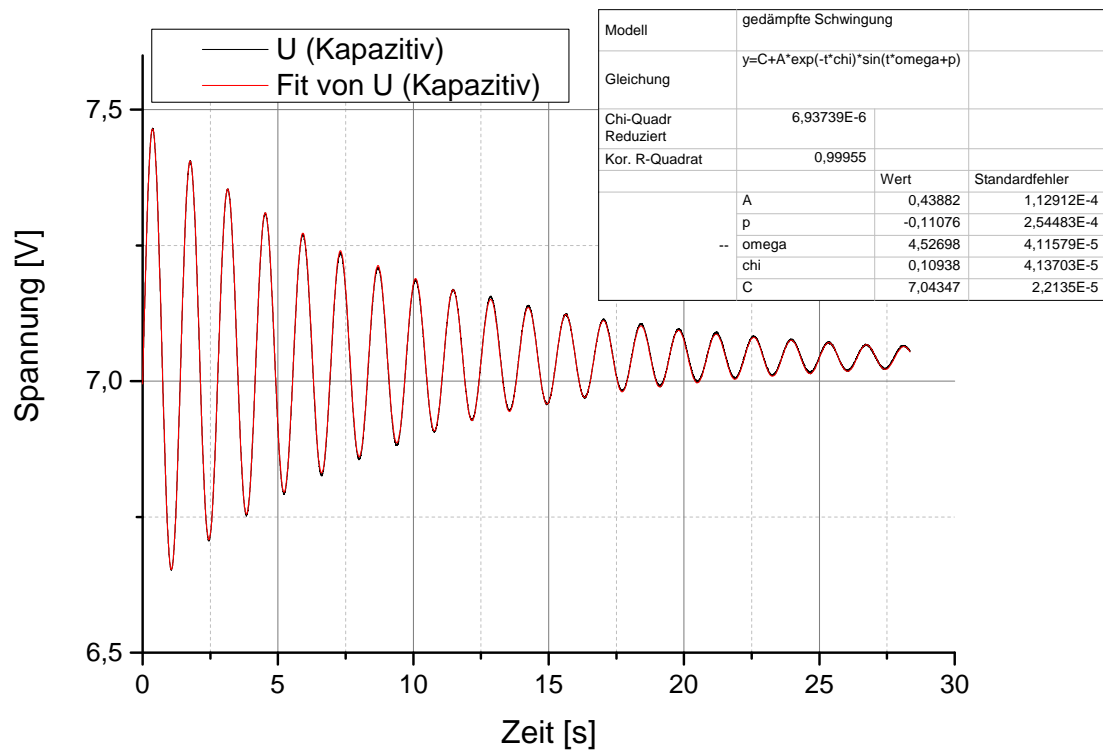


Abbildung 4.4: Ausschnitt der Ausgangsspannung des Entfernungssensors und Fit der Funktion

Programms *Solid Edge* berechnet werden und besitzt den Wert $I_\theta = 0,005387 \text{ kg m}^2$. Nach Formel 2.16 kann nun die Federkonstante berechnet werden:

$$k_\theta = \omega_n^2 I_\theta = 0,110 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}} \quad (4.4)$$

Im weiteren Verlauf wird dieser Wert als Federkonstante für die Auswertungen im Open-Loop-Betrieb verwendet. Sie unterscheidet sich damit um etwa 20 % von den Herstellerangaben, die $0,0919 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$ als Federkonstante angegeben haben.

4.5 Tauchspulenkalibration

Im Closed-Loop-Betrieb wird eine dem Strahlungsdruck gegenwirkende Kraft benötigt, mit deren Hilfe der über die Leistungsmessung berechnete theoretische Schub verifiziert werden kann. Diese Kraft wird mit Hilfe von einer Tauchspule (Spule 2 in Abbildung 4.5) und einem hochgenauen Netzteil erzeugt. Bei der Spule handelt es sich um das Modell *LVCM-010-013-01* der Firma *Moticont*. Es wird noch eine weitere baugleiche Spule (Spule 1 in Abbildung 4.5) diesen Typs verwendet, mit deren Hilfe eine Kraft zu Testzwecken erzeugt werden kann und die normalerweise zur Kalibration der Waage verwendet wird. Bei dem Netzteil handelt es sich um ein *PXI-4110* der Firma *National Instruments*, das in einem Strombereich von bis zu 20 mA eine Stromauflösung von $1 \mu\text{A}$ liefert.

Abbildung 4.5 zeigt die Auswertung der Tauchspulenkalibration. Hierzu wurden bei unterschiedlichen Hublagen Ströme im Bereich von $200 \mu\text{A}$ bis $1000 \mu\text{A}$ angelegt. Die resultierenden Gewichtskräfte wurden mit Hilfe der Analysewaage *Sartorius CPA225D* gemessen und in Schubkräfte umgerechnet. Aus diesen Messreihen wurde für jede Hublage eine lineare Regressionsgerade bestimmt und die mittlere Steigung, also die Kraftkonstante, berechnet.

Die Wahl der Hublage wurde so gewählt, dass die Kraftkonstante ein Maximum erreicht. Die ermittelte und im weiteren Verlauf der Arbeit verwendete Kraftkonstante beträgt $0,34 \frac{\text{N}}{\text{A}}$ und wird erreicht bei einer Hublage von $2,5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Es ist zu beachten, dass das ermittelte Maximum der Kraftkonstante von der Angabe des Herstellers ($0,29 \frac{\text{N}}{\text{A}}$) abweicht.

4.6 Vergleich der Kräfte im Open-Loop-Betrieb

Wie in Kapitel 2.4 gezeigt wurde, begibt sich eine Schubwaage, die mit einer konstanten Kraft belastet wird, in einen stationären Zustand. Der stationäre Zustand bedeutet in unserem Fall, dass sich bei einer gegebenen Schubkraft eine konstante Winkelauslenkung θ einstellt. Außer der Kraft hat die Position, an der die Kraft auf den Balken der Waage übertragen wird, und die Federkonstante des rückstellenden Elements einen Einfluss auf

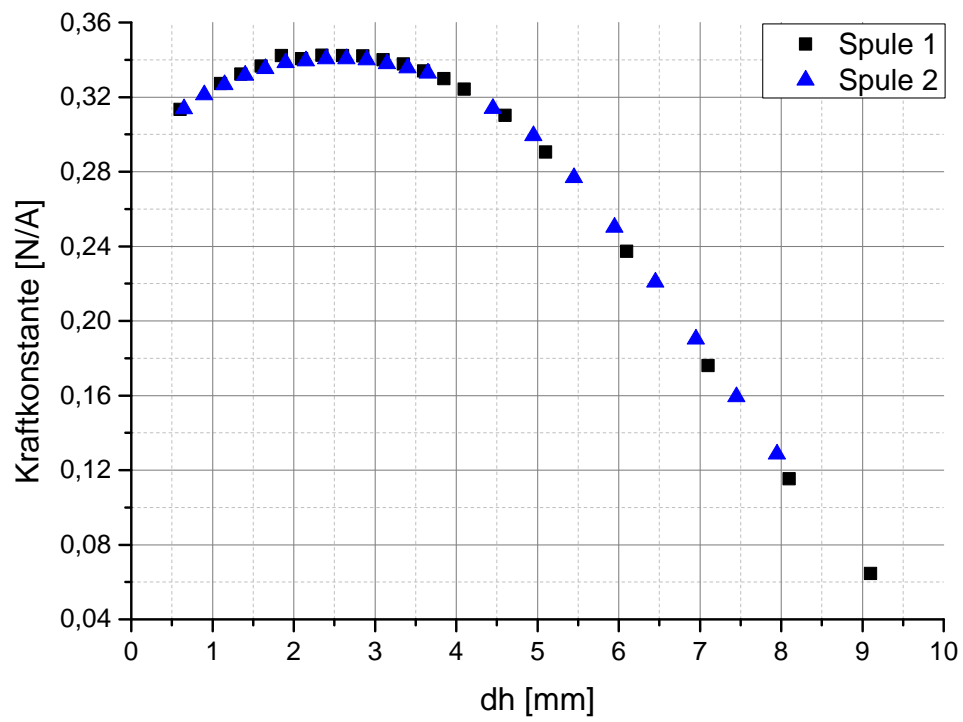


Abbildung 4.5: Kraftkonstanten der Tauchspulen in Abhängigkeit der Hublage

die Winkelauslenkung. Gleichung 2.18 beschreibt diese Zusammenhänge.

Zur Kontrolle des Verhaltens der Waage bei einer gegebenen Kraft wird im Open-Loop-Betrieb die Auslenkung der Waage gemessen. Dies geschieht durch einen kapazitiven Abstandssensor, der in der Entfernung $l_{\text{Kapazitiv}}$ von der Rotationsachse der Waage angebracht ist. Bei dem Sensor handelt es sich um das Modell *CSH02FL-CRm1,4* des Herstellers *Micro-Epsilon*. Das Sensorsystem bestehend aus dem Sensor und einer Ausleseelektronik kann Auslenkungen von 0,2 mm messen und liefert dabei Ausgangsspannungen von 0 V bis 10 V. Anhand von experimentellen Messergebnissen, die der Hersteller in Form eines Prüfzertifikates mitliefert, kann ein linearer Fit durchgeführt werden, der die Auslenkung d in Abhängigkeit der Ausgangsspannung U beschreibt.

$$d [\text{mm}] = 0,02001 \cdot U [\text{V}] - 4,15895 \cdot 10^{-5} \quad (4.5)$$

Aus dieser Formel und der bekannten Länge $l_{\text{Kapazitiv}} = 0,250 \text{ m}$ kann die Winkelauslenkung berechnet werden. Hierbei wird die Kleinwinkelnäherung $\tan(x) = x$ verwendet. Es ist zu beachten, dass die Entfernung $l_{\text{Kapazitiv}}$ schwer bestimmbar ist, da der Sensor gegenüber eines relativ breiten Gegenstücks positioniert wird (Abbildung 2.5). Somit muss $l_{\text{Kapazitiv}}$ mit einem Fehler angenommen werden.

Das verwendete Kreuzfedergelenk *G-10* stammt vom Hersteller *C-Flex Bearing Company*. Als Federkonstante wird allerdings nicht die Herstellerangabe verwendet, sondern der in Kapitel 4.4 berechnete Wert $k_\theta = 0,110 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$.

Die Entfernung l_{Thruster} wird als der Ort auf dem Spiegel angenommen, in dem die Intensitätsverteilung den Mittelpunkt ihrer vollen Halbwertsbreite besitzt. Sie wurde mit Hilfe einer Kamera ermittelt und beträgt 0,282 m.

Aus diesen Angaben kann nun die Kraft berechnet werden, die theoretisch aufgebracht werden müsste, wenn sich die Waage und das Messsystem ideal verhalten würden. Wir nennen diese Kraft $F_{\text{Kapazitiv}}$. Ihr gegenüber steht die Kraft F_{Leistung} , die sich aus der Leistungsmessung außerhalb des Resonators ergibt.

Zur numerischen Berechnung der Kraft wird die außerhalb des Resonators gemessene Leistung durch Anwendung der Formel 4.1 in die innerhalb des Resonators propagierende Leistung umgerechnet. Nach Formel 2.4 kann hiernach die auf den Spiegel übertragene Kraft berechnet werden.

Die Messungen im Open-Loop-Betrieb können in zwei verschiedenen Betriebsmodi durchgeführt werden: Im ungedämpften sowie im aktiv gedämpften Modus. Die Dämpfung geschieht hierbei mittels der Tauchspule, die im Closed-Loop-Betrieb die rückstellende Kraft erzeugt. Ein Vorteil des gedämpften Modus ist, dass die Waage schneller die stationäre Winkelauslenkung erreicht. Dies ist vor allem im Intracavity-Modus hilfreich, da hier durch Schwingen des Waagenspiegels Instabilitäten des Laserbetriebs auftreten

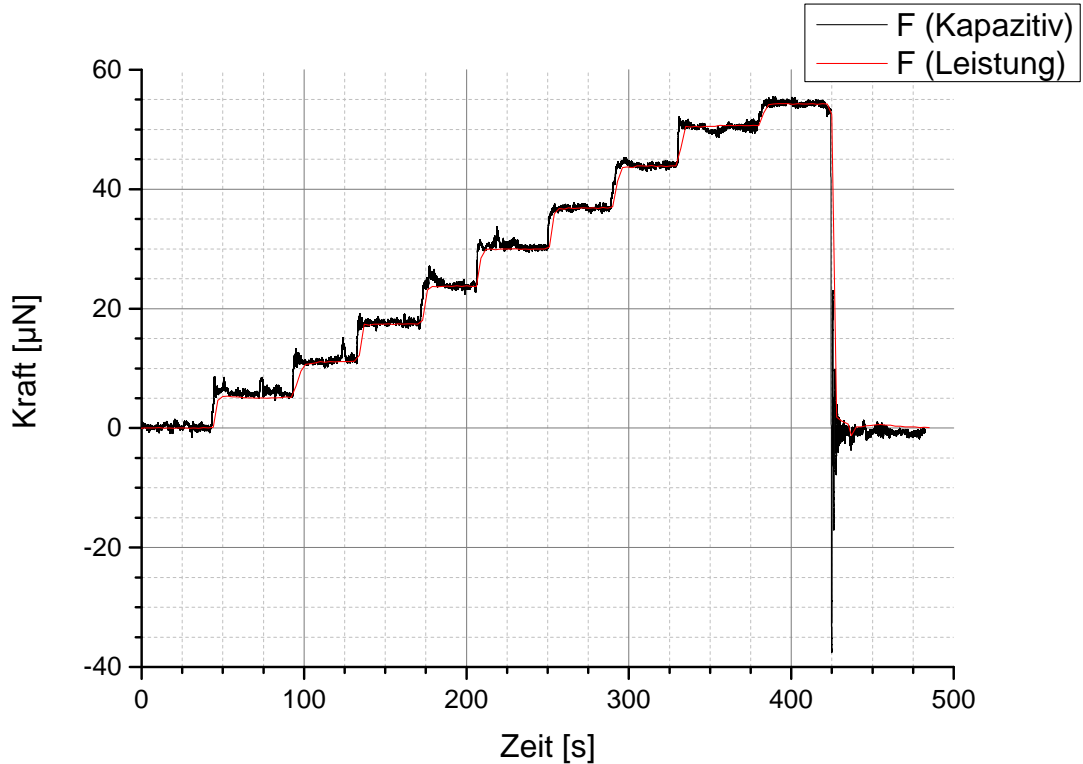


Abbildung 4.6: Vergleich der durch Leistungs- und Abstandsmessung berechneten Kräfte im Open-Loop-Betrieb (Intracavity-Modus)

können.

Abbildung 4.6 zeigt die ausgewerteten Messergebnisse einer Messung im gedämpften Open-Loop-Betrieb. Es ist zu sehen, dass die aus den Leistungsmessungen berechneten Kräfte sehr gut mit den Kräften übereinstimmen, die mit Hilfe der Spannungsmessungen bestimmt wurden. Es ist zu beachten, dass die Nullposition der Waage über die ganze Messzeit einen leichten Drift erfährt. Da er im Gegensatz zu den gemessenen Werten nur sehr gering ist, führt er im Intracavity-Modus zu keinem nennenswerten Fehler.

4.7 Vergleich der Drehmomente im Closed-Loop-Betrieb

Im Closed-Loop-Betrieb wird durch Regelung des Stromes einer Tauchspule das Ausgangssignal des kapazitiven Abstandssensors auf einem konstanten Wert gehalten. Dieser Modus eignet sich vor allem für Intracavity-Messungen, da sich durch die Regelung die Resonatorlänge und die Verkipfung des Spiegels auf der Waage nur in minimalen Bereichen ändert und somit selbst bei hohen Leistungen und Strahlungsdrücken ein stabiler Laserbetrieb ermöglicht wird. Aber auch für Extracavity-Messungen bietet der Closed-

Loop-Betrieb Vorteile, da so der an der Waage reflektierte Strahl auch noch über große Strecken propagieren, kann ohne dass sich die Spiegelverkippen bemerkbar machen.

Soll der Abstandssensor einen konstanten Wert anzeigen, so muss gewährleistet sein, dass zu jedem Zeitpunkt auf beiden Seiten des Balkens das gleiche Drehmoment aufgebracht wird. Zur Validierung des Messsystems wurde deshalb untersucht, welches Drehmoment zum einen durch den Strahlungsdruck und zum anderen durch die Tauchspule auf die Waage wirkt.

Das durch den Laser erzeugte Drehmoment M_{Leistung} lässt sich ermitteln, indem der Strahlungsdruck F_{Leistung} mit dem Abstand l_{Thruster} multipliziert wird. Die Kraft wird hierbei, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben ermittelt. Auch der Abstand von der Rotationsachse, an dem die Kraft auf den Balken wirkt, ist bereits aus den vorherigen Messungen bekannt ($l_{\text{Thruster}} = 0,282 \text{ m}$).

Das rückstellende Drehmoment M_{Spule} wird durch den am Netzteil gemessenen Strom der Tauchspule ermittelt. Multipliziert man die in Kapitel 4.5 ermittelte Kraftkonstante ($k = 0,34 \frac{\text{N}}{\text{A}}$) mit der Stromstärke, so erhält man bereits die durch die Spule erzeugte Kraft. Unter Berücksichtigung der Entfernung von der Rotationsachse, an der die Kraft wirkt ($l_{\text{Spule}} = 0,125 \text{ m}$), ergibt sich somit das gesuchte Drehmoment.

Abbildung 4.7 zeigt die aus einer Messung ermittelten Drehmomente. Es ist zu sehen, dass der Verlauf von M_{Leistung} leicht unterhalb des Verlaufs von M_{Spule} liegt. Um durch Anpassung der Berechnungsparameter für den laserinduzierten Drehmoment eine Anpassung der beiden Kurven zu erzielen, muss der Auskoppelgrad niedriger angenommen werden, als er ursprünglich eingestellt wurde. Dies steht aber im Widerspruch zu den übereinstimmenden Kräften aus den Messungen im Open-Loop-Betrieb, so dass der Grund für die Differenz der beiden Kurven eher in der Kraftkonstante der Tauchspule oder geringfügigen Abweichungen der tatsächlichen Entfernungen von den realen Entfernungen zu suchen ist. Die Abweichung liegt im Bereich der Genauigkeit des Messkopfes.

4.8 Messungen im Extracavity-Modus

Die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Messungen wurden im Intracavity-Modus durchgeführt. Messungen und Auswertungen im Extracavity-Modus verlaufen weitestgehend analog zu dem bereits vorgestellten Verfahren. Da diesmal der ausgekoppelte Strahl auf die Waage geleitet wird, entfällt allerdings die Umrechnung der externen Leistung auf die interne Leistung. Dementsprechend ist die Leistung, die auf dem Waagenspiegel reflektiert wird, etwa um den Faktor 40 kleiner, als im Intracavity-Modus. Eine weitere Verringerung der übertragenen Kraft entsteht dadurch, dass die Schubwaage nur die Kraftkomponente senkrecht zur Spiegelebene misst. Dies wird durch den \cos -Term in Gleichung 2.5 beschrieben. Der Winkel α ist in unserem Fall gleich 10° und bewirkt somit eine Abschwächung der übertragenen Kraft um $\cos(10^\circ) = 0,985$. Ein weiterer

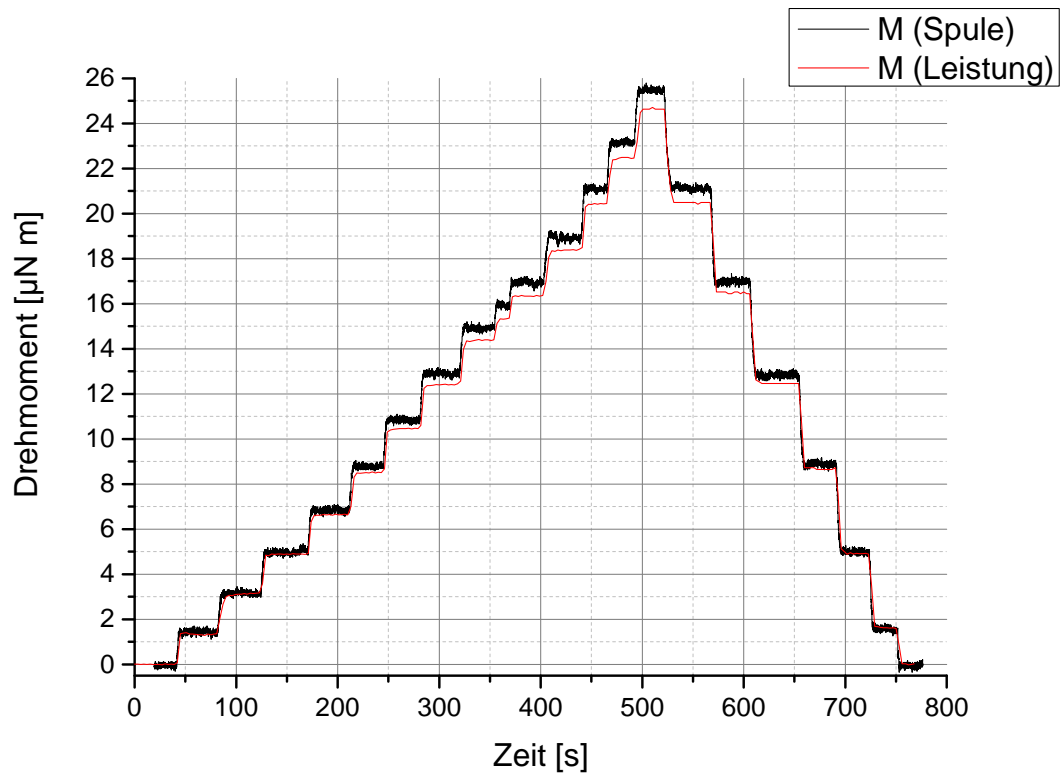


Abbildung 4.7: Vergleich der durch Leistungs- und Strommessung berechneten Drehmomente im Closed-Loop-Betrieb (Intracavity-Modus)

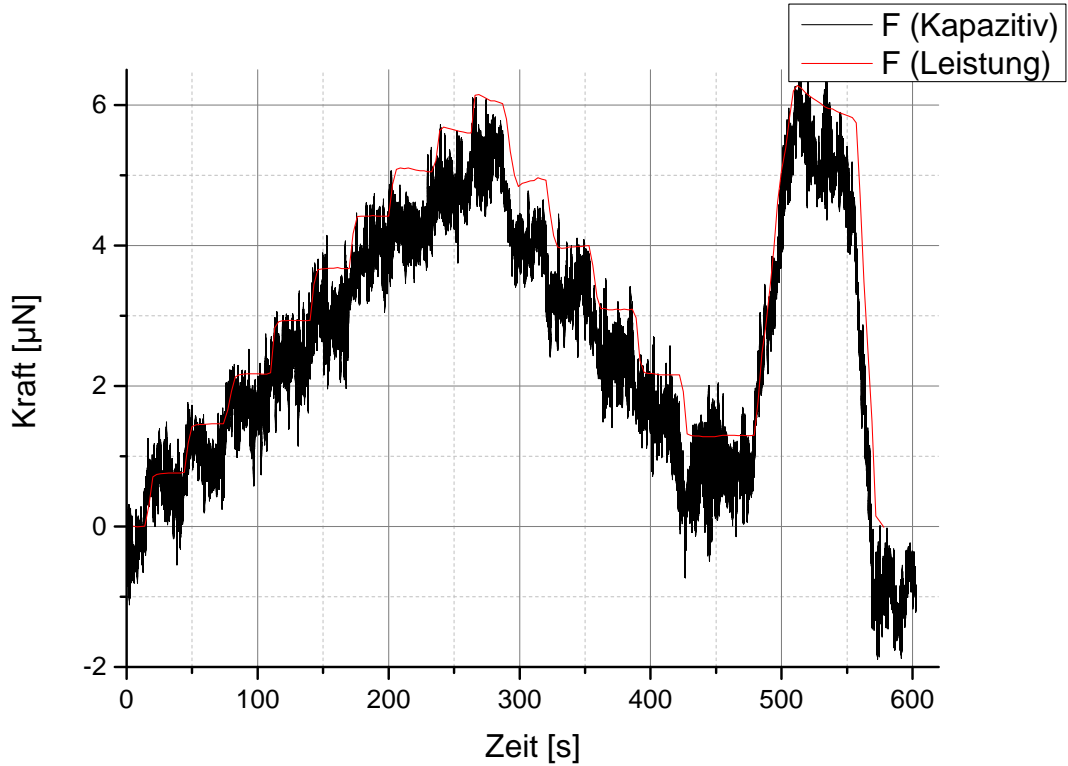


Abbildung 4.8: Vergleich der Kräfte im Open-Loop-Betrieb des Extracavity-Modus

Parameter, der sich bei den Extracavity-Messungen leicht geändert hat, ist die Entfernung l_{Thruster} ; sie wird mit $0,278\text{ m}$ angenommen.

Abbildung 4.8 zeigt die aus Leistungs- und Entfernungsmessung berechneten Kräfte, wie sie im Open-Loop-Betrieb des Extracavity-Modus gemessen wurden. Es ist zu sehen, dass die aus den Leistungsmessungen berechneten Kräfte leicht über den aus den Entfernungsmessungen resultierenden Kräften liegen. Die in der Abbildung dargestellten Kraftstufen entsprechen 4 A-Schritten des Diodenstromes. Dies entspricht Schritten der Laserleistung von etwa 100 W bzw. Schritten der übertragenen Kräfte von $0,7\text{ }\mu\text{N}$. Es ist zum einen erkennbar, dass diese Schritte etwa die gleiche Größe besitzen, wie die Rauschamplitude, die bedingt durch die Verwendung der Schubwaage unter der Flowbox sehr groß ist. Zum anderen ist zu erkennen, dass die Nullposition der Schubwaage über die Dauer der gesamten Messung um etwa den gleichen Wert, wie sie durch die Leistungsschritte erzeugt werden, in negative Richtung driftet. Ein solcher Drift kann auch bei Messungen im Intracavity-Modus beobachtet werden, da hierbei aber die Leistungsschritte wesentlich größer sind, ist der resultierende prozentuale Fehler vernachlässigbar.

Beide aufgezählten Effekte können auch im Closed-Loop-Betrieb beobachtet werden. Abbildung 4.9 zeigt beispielhaft die berechneten Drehmomente einer Messung im Closed-

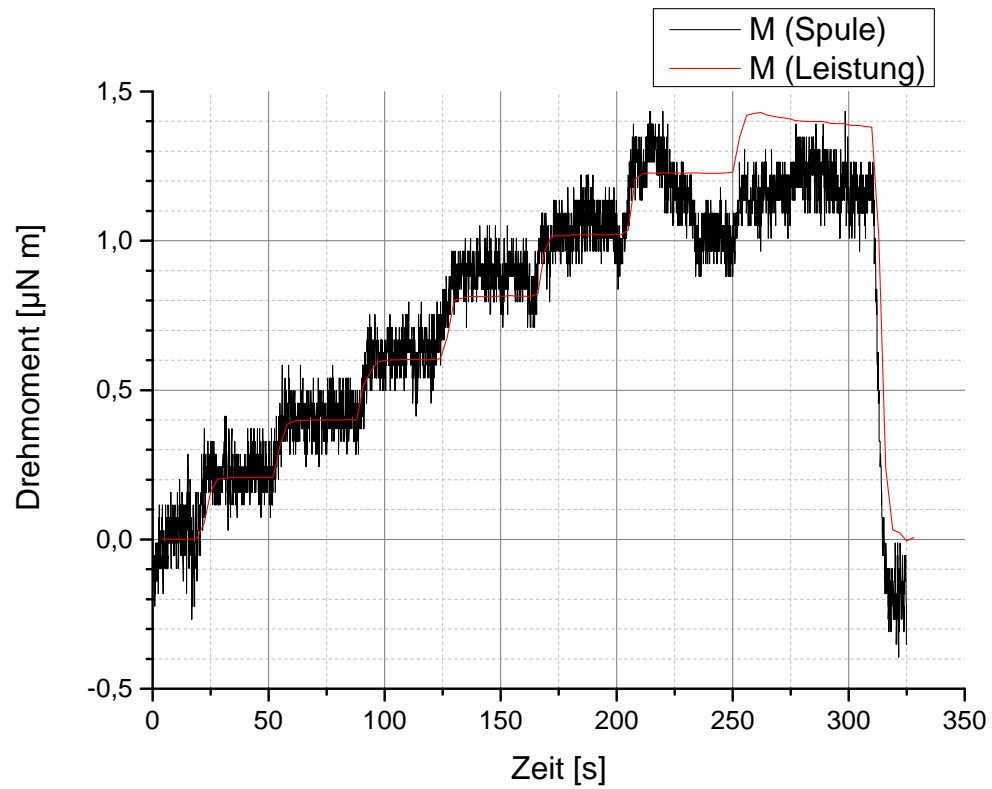


Abbildung 4.9: Vergleich der Drehmomente im Closed-Loop-Betrieb des Extracavity-Modus

Loop-Betrieb des Extracavity-Modus. Die relativ hohe Rauschamplitude sowie der Drift über die gemessene Zeit sind deutlich zu erkennen. Ein weiteres Problem, dass bei den Closed-Loop-Messungen im Extracavity-Modus reproduzierbar bei Laserleistungen von etwa 700 W auftrat, war ein schlagartiges Absinken des Spulenstroms. Die Ursache dieses Phänomens konnte bislang nicht ermittelt werden.

Dem Vorteil, dass im Extracavity-Modus nicht auf die Leistung innerhalb des Resonators geschlossen werden muss und somit der Fehler des nicht genau bekannten Auskoppelgrades entfällt, stehen also zahlreiche Nachteile gegenüber. Neben dem bereits erwähnten schlechten Signal-Rausch-Verhältnis und "Signal-Drift-Verhältnis" kommt noch hinzu, dass der Strom der Pumpdioden in großen Schritten erhöht werden muss, um Leistungsstufen zu erzeugen, die von der Waage aufgelöst werden können. Dies hat zur Folge, dass insgesamt nur wenige Leistungsstufen erzeugt werden können bevor die Pumpleistung ihr zulässiges Maximum erreicht. Das Lasermedium wird also für einen kleinen messbaren Effekt sehr stark beansprucht. Des Weiteren kommt hinzu, dass 100 W in etwa die kleinsten Leistungsschritte sind, die noch im Intracavity-Modus erzeugt werden können (Erhöhung des Pumpstroms um 0,1 A). Es ist jedoch darauf zu achten, dass diese Angaben nur für die verwendete Waagenkonfiguration, das heißt, hauptsächlich für das verwendete Kreuzfedergelenk gelten. Das Kreuzfedergelenk wurde gewählt, da es für den aktuell untersuchten Schubbereich gut geeignet ist und deshalb am häufigsten Verwendung findet. Der Umbau auf ein anderes Kreuzfedergelenk konnte im Zeitrahmen der Masterarbeit nicht mehr durchgeführt werden.

Es sei noch angemerkt, dass die Rauschamplitude in diesem Versuch durch Verwendung der Waage unter der Flowbox relativ groß ist, im geplanten Betrieb innerhalb einer Vakuumkammer auf einer Vibrations-Isolations-Plattform wird diese wesentlich kleiner sein. Da die Messergebnisse im Extracavity-Modus bei der verwendeten Waagenkonfiguration ungeeignet sind, wurden sie nicht bei der Erstellung der Kalibrationsgleichungen berücksichtigt.

5 Kalibration

Nachdem der Aufbau sowie die Datenaufnahme in den vorigen Kapiteln erklärt wurde, sollen in diesem Kapitel zunächst Kalibrationsgleichungen für den Open-Loop- und den Closed-Loop-Betrieb ermittelt werden und hiernach ein Vergleich der Kalibriermethode mit der bisher verwendeten Methode gezogen werden. Hierzu wird zunächst betrachtet, welche Voraussetzungen an die zu kalibrierende Waage gestellt werden, um eine Kalibration durch Aufbringung einer konstanten Kraft durchführen zu können. Danach werden mögliche Fehlerquellen der beiden Kalibriermethoden erörtert. Die erzeugbaren Schubkräfte sowie die kleinsten Schubinkremente werden vorgestellt. Das Kapitel endet mit einer Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile beider Methoden.

5.1 Voraussetzungen für die Kalibrationen

Die wichtigste Voraussetzung dafür, dass wir durch Aufbringung einer definierten konstanten Kraft eine Kalibration durchführen und eine lineare Kalibrationsgleichung bestimmen können, ist, dass sich das System auch linear verhält. In unserem Fall bedeutet dies, dass ein linearer Zusammenhang zwischen aufgebrachter Kraft und Winkelauslenkung besteht.

Des Weiteren müssen auch die Messgrößen einen linearen Zusammenhang zu den Größen, die sie repräsentieren sollen, besitzen. Im Open-Loop-Betrieb ist die Messgröße die Ausgangsspannung des Controllers des kapazitiven Abstandssensors, sie beschreibt die Auslenkung des Balkens entlang der Drehrichtung. Die Linearität des Sensors wird vom Hersteller mit $\pm 0,05\%$ angegeben und die Auflösung mit 4 nm. Im Closed-Loop-Betrieb wird der Strom der Tauchspule gemessen, welche die dem Strahlungsdruck entgegengerichtete Kraft aufbringt. Messungen der erzeugten Kraft in Abhängigkeit des angelegten Stromes haben gezeigt, dass der Standardfehler bei der Linearisierung etwa $10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{A}}$ ist.

5.2 Ermittlung der Kalibrationsgleichungen

Die eigentliche Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, den aufgebauten Laser als Kalibriermaßstab zu nutzen, so dass später auf einer Seite der Waage ein durch laserinduzierte Ablation erzeugter Schub einer definierten Größe zugeordnet werden kann. Es muss also ein Zusammenhang hergestellt werden zwischen dem durch Leistungsmessung definierten Strahlungsdruck und einer zweiten, auch später verwendeten Messgröße. Die Messgröße ist im Open-Loop-Betrieb die Ausgangsspannung des kapazitiven Abstand-

sensors und im Closed-Loop-Betrieb die Stromstärke der Tauchspule, welche die rückstellende Kraft erzeugt.

Zur Ermittlung einer beispielhaften Kalibrationsgleichung, die den gewünschten Zusammenhang herstellt, wurden im Open-Loop-Betrieb drei Messungen durchgeführt. Von diesen Messungen wurden zwei mit einer aktiven Dämpfung und eine ungedämpft aufgenommen. Im Closed-Loop-Betrieb wurden vier Messungen zur Ermittlung der Kalibrationsgleichung durchgeführt. Die Werte der einzelnen Leistungsstufen (siehe Abbildungen 4.6 und 4.7) wurden gemittelt, um den Einfluss des Rauschens möglichst gering zu halten.

Im späteren Gebrauch wird die Aufbringung der Schubkraft nicht an derselben Stelle geschehen, an der im Kalibriervorgang der Strahlungsdruck aufgebracht wird. Selbst wenn die Strahlpositionen des Kalibrierlasers und des Ablationslasers exakt übereinstimmen würden, müsste hierfür ein Umbau der Waage stattfinden, bei dem der Targethalter an die Position des Spiegels gesetzt wird. Dadurch würde der vorangegangene Kalibriervorgang zunichte gemacht. Aus diesem Grund muss die Länge l_{Thruster} als Variable in den Kalibrationsgleichungen auftauchen.

5.2.1 Open-Loop

Im Open-Loop-Betrieb bildet die Ausgangsspannung des kapazitiven Abstandssensors die Messgröße. Zur Ermittlung der Kalibrationsgleichung werden die durch gemittelte Leistungsmessungen berechneten Schubkräfte in Abhängigkeit der zeitgleich gemessenen und danach ebenfalls gemittelten Spannungswerte betrachtet. Aus diesen Messwerten kann hiernach eine lineare Ausgleichsgerade berechnet werden. Die ermittelte Gleichung wird beschrieben durch:

$$F [\mu\text{N}] = 31,7 \cdot U [\text{V}] - 210,3. \quad (5.1)$$

Da, wie bereits erwähnt, die Kalibrationskraft an einem anderen Ort auf der Waage aufgebracht wird, als die Kraft, die später gemessen werden soll, ist es sinnvoll, die Entfernung, an der die Kraft wirkt (l_{Thruster}), in der Gleichung zu berücksichtigen. Hieraus folgt, dass nicht weiter die aufgebrachte Kraft betrachtet wird, sondern das aufgebrachte Drehmoment M . Abbildung 5.1 zeigt die Abhängigkeit des aufgebrachten Drehmoments zur Spannung des kapazitiven Abstandssensors. Die übertragene Kraft kann nun in Abhängigkeit der Spannung des kapazitiven Abstandssensors sowie der Position, an der die Kraft übertragen wird, errechnet werden. Die hierzu benötigte Formel lautet:

$$F [\mu\text{N}] = \frac{1}{l_{\text{Thruster}} [\text{m}]} (9,0 \cdot U [\text{V}] - 59,3) \quad (5.2)$$

5.2.2 Closed-Loop

Im Closed-Loop-Betrieb ist der Strom der rückstellenden Tauchspule die Messgröße mit deren Hilfe der aufgebrachte Schub ermittelt werden soll. Aus diesem Grund wurde auf

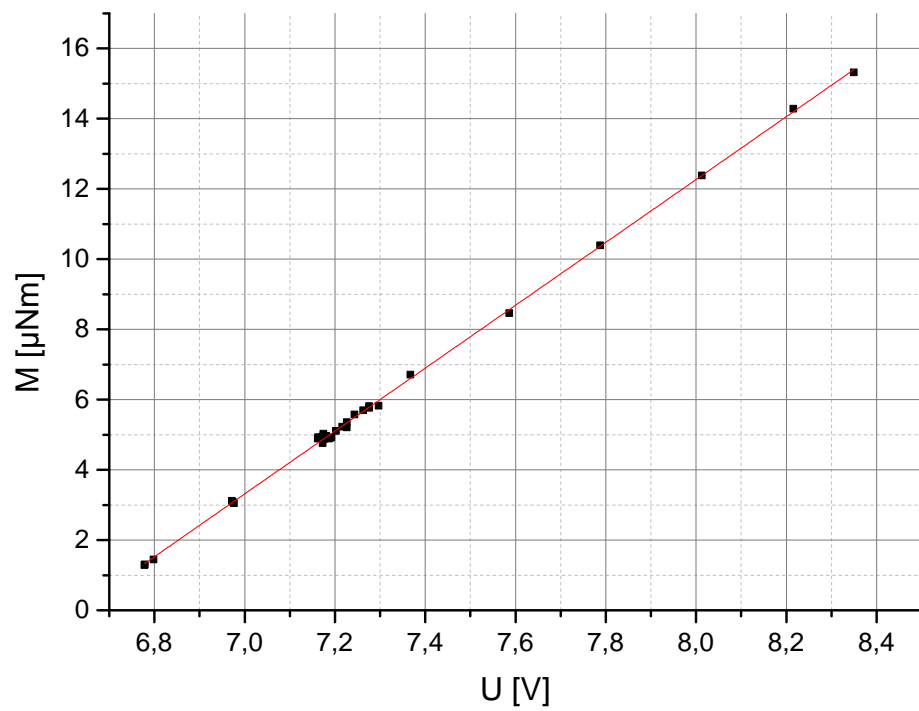


Abbildung 5.1: Abhängigkeit des aufgetragenen Drehmoments von der ausgegebenen Spannung des kapazitiven Abstandssensors

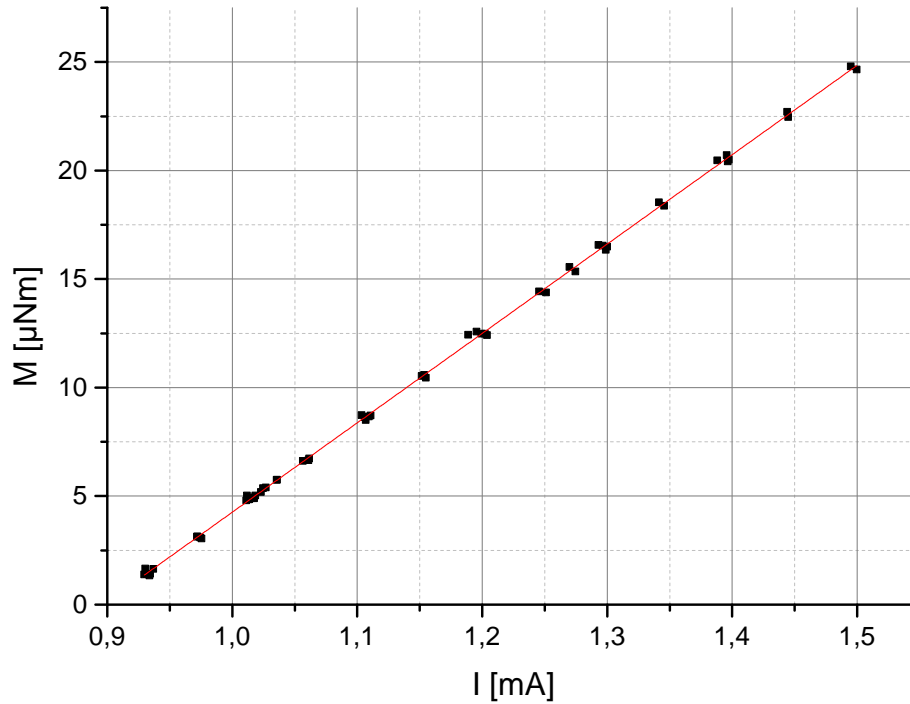


Abbildung 5.2: Abhängigkeit des aufgebrachten Drehmoments von der Stromstärke der rückstellenden Spule

Basis von vier Messungen die Stromstärke bei verschiedenen Strahlungsdrücken ermittelt. Nach Mittelung und Linearisierung der Messdaten kann so anhand der Stromstärke der Spule, welche die Auslenkung der Waage in Nullposition hält, ermittelt werden, welche Schubkraft auf die Waage wirkt. Die Formel für die Regressionsgerade lautet:

$$F [\mu\text{N}] = 145,9 \cdot I [\text{mA}] - 130,8 \quad (5.3)$$

Berücksichtigt man erneut die Entfernung l_{Thruster} , so ergibt sich ein Zusammenhang zwischen aufgebrachtem Drehmoment und Spulenstrom, wie er in Abbildung 5.2 zu sehen ist. Mithilfe der folgenden Formel kann nun für alle beliebigen Längen von l_{Thruster} eine Kraft einem Spulenstrom zugewiesen werden.

$$F [\mu\text{N}] = \frac{1}{l_{\text{Thruster}} [\text{m}]} (41,2 \cdot I [\text{mA}] - 36,9) \quad (5.4)$$

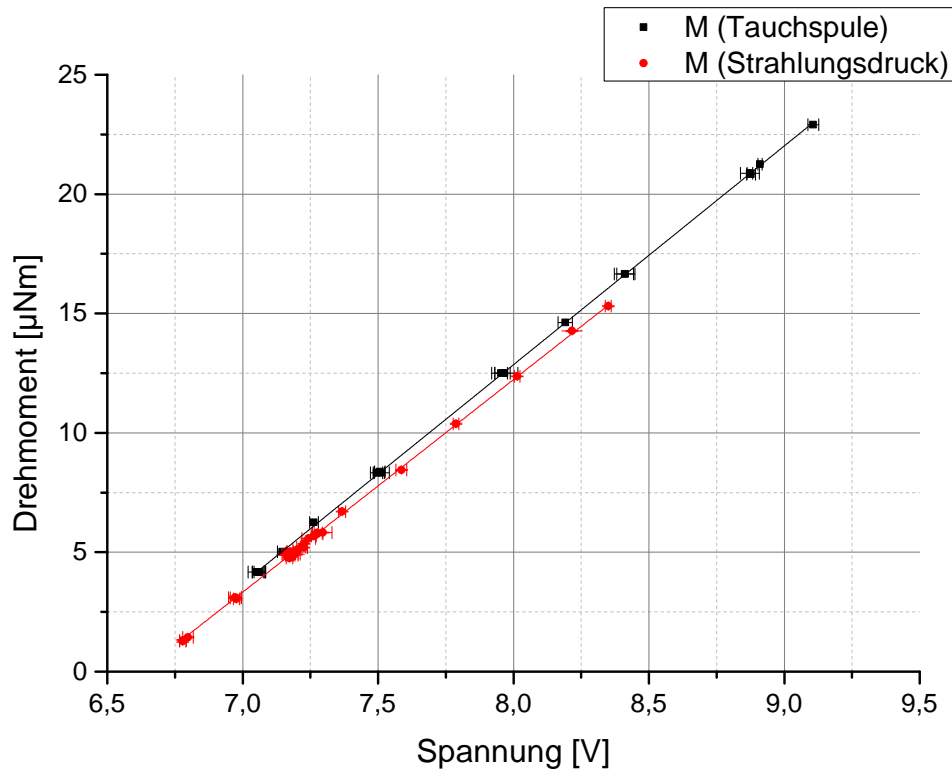


Abbildung 5.3: Die im Open-Loop-Betrieb ermittelten Kalibrationsgleichungen im Vergleich

5.3 Vergleich der Kalibrationsgleichungen

Nachdem nun erläutert wurde, wie mithilfe des Strahlungsdrucks eine Kalibration durchgeführt werden kann, soll ein Vergleich der durch die verschiedenen Kalibriermethoden ermittelten Gleichungen durchgeführt werden.

5.3.1 Open-Loop

Analog zur Bestimmung der Kalibrationsgleichung bei der Kalibration mittels Strahlungsdruck kann auch für die Kalibration mittels Tauchspule eine Gleichung aufgestellt werden. Anstatt der Messung, Mittelung und Linearisierung der Laserleistung müssen dieselben Schritte mit dem gemessenen Strom der Tauchspule durchgeführt werden. Durch Multiplikation der Stromstärke mit der in 4.5 ermittelten Kraftkonstante kann somit die Referenzkraft bestimmt werden, die zur Kalibration benötigt wird. Durch eine weitere Multiplikation mit der Entfernung, an der die Kraft aufgebracht wird, erhält man das aufgebrachte Drehmoment. Zur Bestimmung der Kalibrationsgleichung bei der Kalibration mittels Tauchspule wurden zwei Messungen verwendet.

In Abbildung 5.3 sind die einzelnen Messwerte und die durch Linearisierung ermittelten

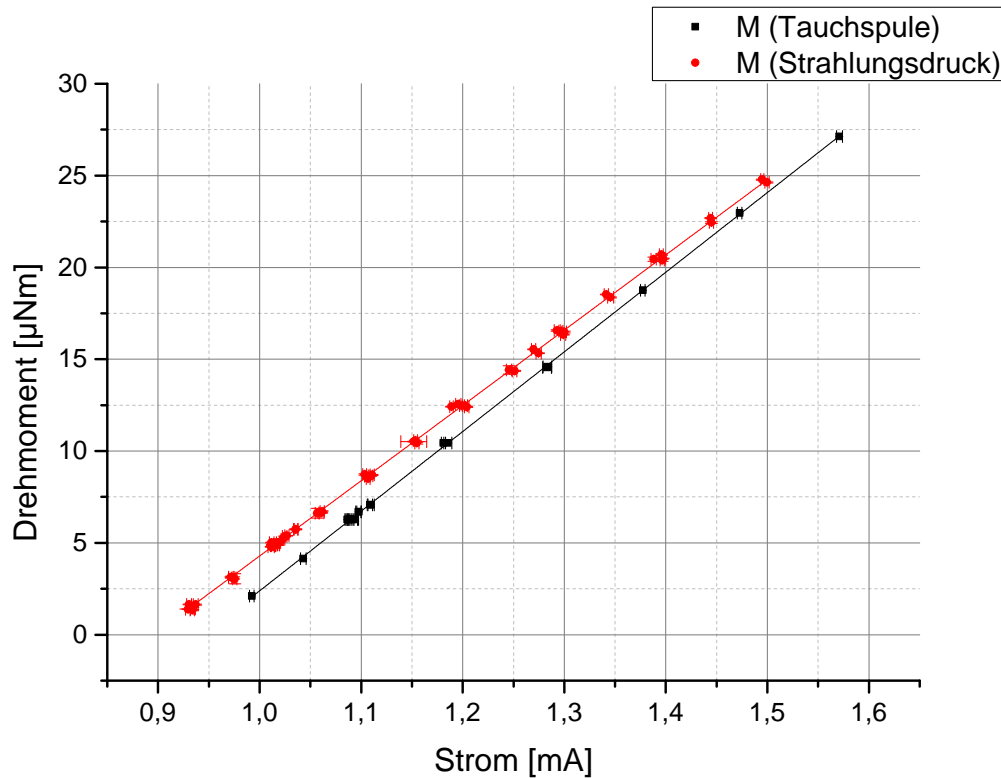


Abbildung 5.4: Die im Closed-Loop-Betrieb ermittelten Kalibrationsgleichungen im Vergleich

Regressionsgeraden der beiden Kalibriermethoden zu sehen. Die beiden Geraden weichen hierbei maximal um etwa 9 % voneinander ab. Die in der Abbildung eingezeichneten Fehlerbalken verdeutlichen die bei der Mittelung der Messwerte entstehenden Standardabweichungen.

Auch bei der Linearisierung der einzelnen Messwerte treten Fehler auf. Der Standardfehler der Linearisierung ist bei der Kalibration mittels Tauchspule $\pm 0,3\%$, bei der Kalibration mittels Strahlungsdruck ist dieser mit $\pm 0,6\%$ etwas höher.

5.3.2 Closed-Loop

Auch im Closed-Loop-Betrieb wurde eine zusätzliche Kalibration mithilfe der Tauchspule durchgeführt. Die gemittelten Werte sowie die dazugehörigen Ausgleichsgeraden sind in Abbildung 5.4 zu sehen. Die eingezeichneten Fehlerbalken stellen auch in dieser Abbildung wieder den Standardfehler dar, der bei der Mittelung der einzelnen Messwerte entsteht.

Im Closed-Loop-Betrieb stimmen die beiden ermittelten Kalibrationsgleichungen weniger gut überein. Vor allem im unteren Bereich der aufgetragenen Drehmomente weichen

die ermittelten Geraden voneinander ab, so dass eine Abweichung von etwa 48 % auftritt. Im oberen Bereich beträgt die Abweichung hingegen nur etwa 3 %.

Die Standardabweichung der Linearisierung ist sowohl bei der Kalibration mittels Strahlungsdruck als auch bei der Kalibration mittels Tauchspule mit $\pm 0,4$ % ermittelt worden.

5.4 Einige Fehlerquellen

Bei einer Kalibration mittels Tauchspule wird aus dem Spulenstrom durch Multiplikation mit einer vorher ermittelten Kraftkonstanten die aufgebrachte Kraft berechnet. Eine Fehlerquelle ist somit die Genauigkeit des Netzteils, welche durch eine Readback-Funktion mit einer Auflösung von $0,2 \mu\text{A}$ und einer Genauigkeit von 0,15 % des eingestellten Stromes allerdings sehr gering ist. Der oben beschriebene lineare Zusammenhang zwischen erzeugter Kraft und Spulenstrom wird auch hier wieder als perfekt angenommen, besitzt jedoch einen Linearisierungsfehler analog zu dem oben genannten. Die Steigung, die durch die Linearisierung erhalten wird, ist die benötigte Kraftkonstante. Bevor jedoch eine Linearisierung stattfinden kann, muss zunächst vermessen werden, welche Gewichtskraft bei gegebenem Spulenstrom und gegebener Hublage dh erzeugt wird. Dies wird mithilfe der Analysewaage durchgeführt, die eine Standardabweichung von $\leq \pm 0,02 \text{ mg}$ bei einer Ablesbarkeit von $0,01 \text{ mg}$ besitzt. Zuletzt entsteht auch ein Fehler durch das Einstellen der Hublage dh . Eine Einstellgenauigkeit von $\pm 0,5 \text{ mm}$ führt zu einer Ungenauigkeit der Kraftkonstanten von $\leq \pm 0,1$ %.

Bei der Kalibration mittels Strahlungsdruck wird die Laserleistung gemessen und hieraus die auf die Waage übertragene Kraft berechnet. Die Genauigkeit des Leistungsmesskopfes wird vom Hersteller mit ± 5 % angegeben und ist somit die Komponente mit dem größten prozentualen Fehler. Die Linearität des Leistungsmesskopfes ist mit ± 2 % angegeben. Im Intracavity-Modus muss zunächst von der gemessenen Leistung auf die im Resonator befindliche Leistung rückgeschlossen werden. Hierzu wird vorher durch Vergleichsmessungen mit einem Auskoppelspiegel eine bestimmte Konfiguration der $\frac{\lambda}{4}$ -Verzögerungsplatte eingestellt. Der Auskoppelgrad kann so mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 0,1$ % eingestellt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die zugrundeliegenden Leistungsmessungen fehlerbehaftet sind (± 5 %). Nach Formel 2.5 wird dann die übertragene Kraft bestimmt. Die Reflektivität des Spiegels wird vom Hersteller mit $> 99,98$ % angegeben, allerdings ohne weitere Angaben zu herstellungsspezifischen Toleranzen. Im Extracavity-Modus muss der Laserstrahl unter einem Winkel auf den Spiegel treffen, so dass durch ungenaue Justage auch hier ein Fehler entstehen kann. Wird der Winkel auf $10^\circ \pm 1^\circ$ eingestellt, so führt dies aufgrund des \cos -Terms zu einem Fehler von $< \pm 0,3$ %.

Auch einige Fehler, die sich aus den zur Bestimmung der Messgrößen gemachten Annahmen ergeben, sollen an dieser Stelle erwähnt werden. Zum einen wird bei der Berechnung des Strahlungsdruckes angenommen, dass keine Transmission durch den Spiegel stattfindet, sondern alle Photonen zunächst absorbiert und ein großer Teil hiernach wieder

reemittiert werden. Da die Anteile der Strahlung, die nicht reflektiert werden, im Promillebereich liegen, ist der durch die Näherung entstandene Fehler sehr klein.

Eine andere fehlerbehaftete Annahme wird bei der Berechnung der internen Leistung sowie bei der Bestimmung des Auskoppelgrades gemacht. In beiden Fällen wird davon ausgegangen, dass die Leistung innerhalb des Resonators an jeder Stelle den gleichen Wert besitzt. Verluste durch Transmission und Absorption sowohl an Spiegeln als auch am TFP werden ebensowenig berücksichtigt, wie die Tatsache, dass die Leistung vor Durchlauf der Scheibe geringer, ist als nach Durchlauf der Scheibe.

Diese Aufzählung von Fehlern hat keineswegs den Anspruch auf Vollständigkeit. Sie soll lediglich einige Probleme bei dem Aufbau des Kalibriersystems und der Auswertung, der damit ermittelten Daten, darstellen.

5.5 Kraftbereich und Schubinkrement

	Photonendruck (Extracavity)	Photonendruck (Intracavity)	Tauchspule
Kraftbereich	$0,1 \mu\text{N} \dots 6 \mu\text{N}$	$4 \mu\text{N} \dots 244 \mu\text{N}$	$70 \mu\text{N} \dots 7 \text{mN}$
Kleinstes Schubinkrement	$0,01 \mu\text{N}$	$0,5 \mu\text{N}$	$0,3 \mu\text{N}$

Tabelle 5.1: *Kraftbereich und kleinstes Schubinkrement der Kalibriermethoden*

Zur Charakterisierung eines Kalibrierverfahrens, das eine definierte Kraft aufbringen soll, ist es wichtig zu wissen, welcher Kraftbereich erzeugt werden kann und somit für welchen Bereich der Kraftsensor kalibriert werden kann. Eine weitere wichtige Größe ist das kleinste erzeugbare Inkrement, so dass ermittelt werden kann, welche Schritte der Sensor (in unserem Fall die Schubwaage) noch auflösen kann. Aus diesem Grund sind in Tabelle 5.1 diese Größen für die verschiedenen verwendeten Kraftaktoren angegeben. Zur Berechnung der Größen im Intracavity-Modus wurde ein Auskoppelgrad von 2,4 % angenommen. Es ist zu sehen, dass die Kräfte, die mittels Strahlungsdruck aufgebracht werden können, zumeist kleiner sind, als die durch die Tauchspule aufgebrachten Kräfte. Je nachdem, welche Schubkraft durch laserinduzierte Ablation erzeugt werden soll, bietet sich also die eine oder andere Kalibriermethode an. Während Schubkräfte im mN-Bereich eher für Satelliten im LEO und zur Beseitigung von Weltraumschrott benötigt werden, sind in höheren Umlaufbahnen zum Ausgleich des Strahlungsdrucks der Sonne Schubkräfte im μN -Bereich vonnöten. Das Schubinkrement betreffend, sind eindeutig die sehr kleinen Schritte im Extracavity-Modus der Kalibration durch Strahlungsdruck vorzuziehen.

5.6 Vor- und Nachteile der Kalibriermethoden

Die Kalibration mithilfe der Tauchspule bietet einen Nachteil, aus dem auch die Motivation entstand, eine neue Kalibriermethode zu untersuchen. Dieser Nachteil ist, dass sich die verwendete Tauchspule auch während den Messungen innerhalb des Aufbaus befindet. Selbst wenn der Ausgang des Netzteils deaktiviert ist, so werden trotzdem durch das Bewegen des Magneten Ströme in der Spule induziert.

Ein weiterer Nachteil ist die kleinstmögliche erzeugbare Kraft, die mit einem Wert von $70\,\mu\text{N}$ relativ hoch ist. Da jedoch immer das aufgebrachte Drehmoment ausschlaggebend ist und der modulare Aufbau des Balkens der Waage eine große Freiheit in der Wahl der Position des Tauchspulenkörpers ermöglicht, kann dieses Defizit zumindest teilweise ausgeglichen werden. Diese Entfernung von der Rotationsachse kann außerdem konstruktionsbedingt sehr gut ermittelt werden. Ein Netzteil, das noch geringere Ströme erzeugen kann, würde dieses Problem auch verkleinern.

Vorteilhaft bei der Kalibration mittels Tauchspule ist auch der relativ geringe Materialaufwand. Neben dem in alle drei Raumrichtungen verstellbaren Tauchspulenhalter wird lediglich eine hochgenaue Stromquelle benötigt. Dieser simple Aufbau führt auch dazu, dass die Kalibration problemlos von einer einzelnen Person durchgeführt werden kann.

Im Gegensatz hierzu ist der Aufbau bei der auf Strahlungsdruck basierenden Kalibriermethode größer und komplexer. Neben dem optischen Aufbau, der ungefähr eine Fläche von $120\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ einnimmt, wird weiterhin ein Netzteil mit einer Ausgangsleistung von etwa $3,5\text{ kW}$ und eine Wasserkühlung für das Lasermodul sowie für den Leistungsmesskopf benötigt. Des Weiteren muss der Laser unter einer Flowbox betrieben werden, um zu verhindern, dass sich auf den optischen Komponenten Staub absetzt, der in Folge der hohen Leistungen sofort in das Material eingebrannt werden würde. Auch die Handhabung erweist sich vor allem bei hohen Ausgangsleistungen als wesentlich komplizierter, da der Operateur neben der Bedienung des Netzteils und der Werkstellung der Datenakquisition, auch noch den optischen Aufbau sowie das Kamerabild der Scheibe überwachen muss. Eine weitere Automatisierung zur Steuerung und Datenaufnahme des Diodenstromes wäre allerdings möglich.

Nachteilig ist auch die hohe Ungenauigkeit bei der Messung der Laserleistung von $\pm 5\%$, die sich auch durch Nutzung eines anderen Leistungsmesskopfes mit geringerem Messbereich oder indirektem Messverfahren nur geringfügig verbessern lässt.

Komplementär zu den Nachteilen der Kalibration mithilfe einer Tauchspule, sind bei der Kalibration durch Strahlungsdruck die Vorteile: Die absolute Trennung von Kalibrations- und Messvorgang und das sehr geringe Schubinkrement. Mit diesem Inkrement können Kraftschritte erzeugt werden, die sich in der selben Größenordnung befinden, wie der durch laserinduzierte Ablation erzeugte Impuls eines Einzelpulses.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit am ITP des DLR in Stuttgart wurden zwei ineinander verschachtelte Laserresonatoren aufgebaut, mit deren Hilfe eine neue Kalibriermethode für Schubmessungen mit einer Torsionswaage untersucht und durchgeführt wurde. Hierzu wurde, durch Reflektion des Laserstrahls an einem auf der Torsionswaage befindlichen Spiegel eine Kraft übertragen. Bei einem der Laser war dieser Spiegel ein Resonatorendspiegel (Intracavity-Modus), bei dem anderen wurde ein ausgekoppelter Strahl reflektiert (Extracavity-Modus). Diese Kalibriermethode wurde verglichen mit der bisherigen Methode, bei der eine Kraft durch eine Tauchspule aufgebracht wird.

Der Aufbau des Versuchs beinhaltet neben den verschiedenen optischen Komponenten des Lasers auch andere wichtige Bauteile. Hierzu gehören eine Fluoreszenzabschaltung, die bei Defekten der Scheibe die Stromversorgung unterbricht, eine Kamera zur Überwachung der Scheibe und zur Einstellung des Lasers, ein Interlocksystem zur Abschaltung des Stromes beim unerwartetem Eintreten einer Person in das Labor und alle nötigen Schläuche und Verbindungen der Wasserkühlung.

Zur Bestimmung der resonatorinternen Leistung wurde zunächst ein Auskoppelspiegel bezüglich seiner Transmission vermessen und danach als Referenz zur variablen Auskopplung durch die Polarisationsoptik dafür verwendet, einen festen Auskoppelgrad einzustellen.

Zur ersten Validierung des theoretischen Zusammenhangs zwischen gemessener Laserleistung und der auf den Waagenspiegel übertragenen Kraft wurden Messungen mit einer kommerziellen Analysewaage durchgeführt.

Hiernach wurde die Analysewaage mit der im Institut konstruierten Schubwaage ausgetauscht. An ihr wurden sowohl im Intracavity- als auch im Extracavity-Modus Messungen im Open-Loop- und Closed-Loop-Betrieb durchgeführt.

Im Open-Loop-Betrieb wird durch Aufbringung der Kraft eine Winkelauslenkung der Waage erzielt. Zur Validierung der Messergebnisse wurde diese Winkelauslenkung mithilfe eines Abstandssensors gemessen. Es wurde ein Vergleich durchgeführt zwischen der theoretisch durch den Strahlungsdruck aufgebrachten Kraft und der Kraft, die durch die Auslenkung der Waage und deren theoretischen Verhalten berechnet wurde.

Im Closed-Loop-Betrieb wird die Auslenkung der Waage auf einem konstanten Wert gehalten. Dies geschieht durch Aufbringung einer Gegenkraft mithilfe einer Tauchspule.

Da Photonendruck und Gegenkraft in unterschiedlichen Entfernungen von der Rotationsachse der Waage aufgebracht werden, wurden zur Validierung der Messung die Drehmomente verglichen.

Sowohl der Vergleich der Kräfte im Open-Loop-Betrieb als auch der Vergleich der Drehmomente im Closed-Loop-Betrieb hat gezeigt, dass die Abweichungen in allen Fällen $\leq 5\%$ sind. Sie liegen somit in der selben Größenordnung wie die Messungenauigkeit des Leistungsmesskopfes.

Hiernach wurden testweise Kalibrationen in beiden Betriebsarten durchgeführt. Hierzu wurden mehrere Messreihen aus Messungen im Intracavity-Modus verwendet. Die Messungen aus dem Extracavity-Modus wurden hierbei nicht mit einbezogen, da das Signal-Rausch-Verhältnis sowie das "Signal-Drift-Verhältnis" bei der verwendeten Konfiguration der Waage (Kreuzfedergelenk, Entfernungen zur Rotationsachse, Umgebung) sehr klein war.

Abschließend wurden Voraussetzungen und einige Fehlerquellen der Kalibriermethoden diskutiert. Die Kalibration mittels Strahlungsdruck wurde mit dem bisher genutzten Kalibrierverfahren verglichen. Es wurde der erzielbare Kraftbereich sowie das kleinstmögliche Schubinkrement vorgestellt und die Vor- und Nachteile der beiden Kalibriermethoden aufgezeigt.

6.1 Weitere Vorgehensweise

Da die zu kalibrierende Schubwaage konstruiert wurde für die Schubmessung von Mikroantrieben in der Raumfahrt, wird diese auch normalerweise innerhalb einer Vakuumkammer betrieben. Soll die getestete Kalibriermethode also für den ständigen Gebrauch im Labor genutzt werden, muss die Schubwaage zurück in die vorgesehene Vakuumkammer gebracht werden.

Für den Laseraufbau bedeutet dies zum einen, dass die bisher noch nicht aufgebaute Polarisationsoptik zur Einkopplung des Strahls in die Vakuumkammer implementiert und getestet werden muss. Hierzu ist die Konstruktion eines Flansches mit eingebautem Brewsterfenster nötig. Da selbst prozentual geringe Reflektionen am Brewsterfenster innerhalb des Resonators zu hohen Leistungen führen, sollten idealerweise Strahlfallen in den Flansch integriert sein.

Zum Betrieb der Laser ist eine laminare Luftströmung vonnöten. Diese hält den optischen Aufbau staubfrei und verhindert so Schäden an den optischen Elementen. Aus diesem Grund ist die Anschaffung einer Tabletop-Flowbox nötig.

Die Schubwaage war in dieser Arbeit in einer Einhausung unter einer Flowbox aufgebaut, was zu einer hohen Rauschamplitude geführt hat. Bezüglich der Messungen

bedeutet der Umzug, dass die Umgebungsbedingungen wesentlich verbessert werden. Zum einen, da der Tisch, auf dem sich die Vakuumkammer befindet, besser gedämpft ist, zum anderen, da sich die Waage innerhalb der Vakuumkammer auf einer Vibrations-Isolations-Plattform befindet. Selbst ohne Nutzung der Vibrations-Isolations-Plattform verkleinert sich die Rauschamplitude der Waage etwa um eine Größenordnung.

Weitere Verbesserungen der verschiedenen Messgrößen im normalen Betrieb (Spannung des kapazitiven Abstandssensors, Strom der Tauchspule) könnten durch nachträgliche Bearbeitung der Signale erzielt werden. Eine Idee hierzu ist es, Anteile auszufiltern, die eine höhere Frequenz besitzen, als die Waage aufgrund ihrer Trägheit ausführen kann. Diese hochfrequenten Beiträge können als reines Detektorrauschen angesehen werden und bieten keinen relevanten Informationsgewinn.

Bis jetzt wurde die Laserleistung immer mit einem thermischen Leistungsmesskopf mit geringer zeitlicher Auflösung gemessen. Zur genaueren Bewertung sollte auch hier untersucht werden, ob Schwankungen in der Leistung und somit auch in der übertragenen Kraft auftreten. Denkbar wäre hier zum Beispiel eine durch die Netzfrequenz ausgelöste 50 Hz-Modulation. Dies kann mittels einer Photodiode hinter einem Spiegel festgestellt werden.

Ein letzter Verbesserungsvorschlag ist die Erhöhung des Auskoppelgrades. Ausgehend davon, dass der Auskoppelgrad mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1\%$ eingestellt werden kann, ergibt sich ein kleinerer prozentualer Fehler je höher der Auskoppelgrad ist. Es ist jedoch zu beachten, dass sich dadurch der Kraftbereich des Intracavity-Modus nach unten, der des Extracavity-Modus nach oben verschiebt.

6.2 Leistungsmessung durch Kraftmessung

Die grundlegende Idee dieser Arbeit war es, anhand einer Leistungsmessung auf eine Kraft rückzuschließen. Allerdings wurde die Kraft zur Verifizierung auch immer noch auf einem zweiten Wege ermittelt. Ausgelöst durch die Veröffentlichung [32] kam im Laufe der Arbeit die Idee auf, das Messkonzept umzudrehen und mithilfe von Kraftmessungen Laserleistungen zu ermitteln. Diese Idee ist keineswegs neu [33], wird aber durch Entwicklung von Lasern mit immer höheren Ausgangsleistungen relevanter.

Absolutmessungen der Laserleistung beruhen in den meisten Fällen auf einem kalorimetrischen Messprinzip. Abbildung 6.1 zeigt eine Skizze eines solchen Leistungsmesskopfes. Der Laserstrahl trifft in der Mitte des Sensors auf, wird absorbiert und erwärmt den Leistungsmesskopf. Der nach außen hin abfallende Temperaturgradient erzeugt somit in den ringförmig angebrachten Thermoelementen aufgrund des Seebeck-Effektes Potentialunterschiede, die in Leistungen überführt werden können.

Eine weitere Möglichkeit der thermischen Leistungsmessung ist die Erhitzung von Wasser.

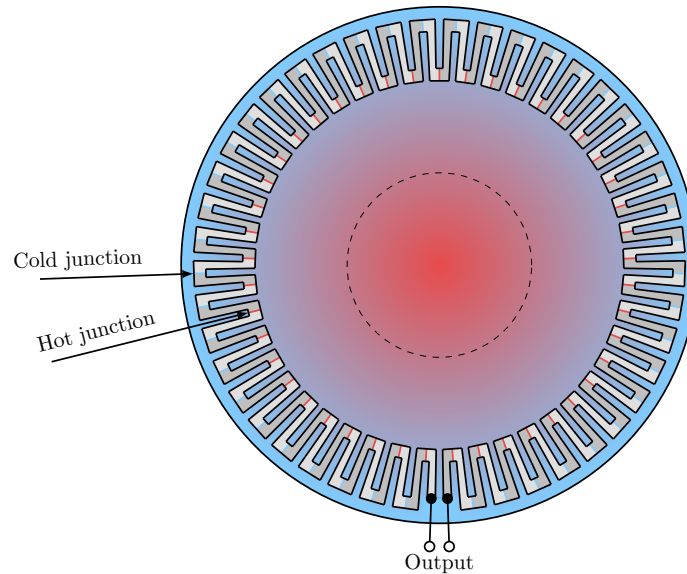


Abbildung 6.1: Schematische Skizze eines kalorimetrischen Leistungsmesskopfs (nach[34])

Durch Messen der Temperatur und der Flussrate können so Leistungen bis zu 100 kW gemessen werden [35].

Einige Probleme bei thermischen Leistungsmessungen sind die relativ hohe Ungenauigkeit von etwa $\pm 5\%$ und die Trägheit des Messprinzips. Vor allem bei der Messung von höheren Laserleistungen ($P > 10\text{ kW}$) nehmen diese Probleme zu.

Hier könnte eine Leistungsbestimmung mittels Kraftmessung Abhilfe schaffen. Ein zusätzlicher Vorteil bei diesem Messprinzip wäre, dass der zu messende Laserstrahl nicht im Leistungsmesskopf “verbraucht” werden müsste, sondern weiter genutzt werden könnte. Es könnte also eine Onlinemessung stattfinden.

Mit der Schubwaage, wie sie in dieser Arbeit verwendet wurde, wäre es möglich, ein Leistungsmessgerät mit einer Auflösung von etwa 100 W zu realisieren. Der begrenzte Faktor ist hierbei das Eigenrauschen der Waage. Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, kann aber durch Veränderung der Umgebungsbedingungen eine Verbesserung des Rauschverhaltens um mindestens eine Größenordnung erreicht werden. Auflösungen im Bereich von etwa 10 W sollten demnach auch realisierbar sein.

Im Open-Loop-Betrieb wären durch Ausnutzung des gesamten Messbereichs des kapazitiven Sensors Leistungsmessungen bis zu 45 kW möglich. Im Closed-Loop-Betrieb wären sogar Leistungsmessungen bis zu 450 kW möglich. Der begrenzte Faktor wäre hier die maximal mit der Tauchspule erzeugbare Gegenkraft.

Durch die geeignete Auswahl von Kreuzfedergelenken und der Entfernungen der Kom-

ponenten zur Rotationsachse sowie durch die Verwendung von Tauchspulen mit anderen Kraftkonstanten kann der Kraftbereich nahezu frei gewählt werden.

Dieses Messkonzept bietet also einige Vorteile und verspricht große Erfolge. Der Aufbau eines Leistungsmesskopfes basierend auf Kraftmessung ist angedacht.

Abkürzungsverzeichnis

DLR Deutsches Zentrum für Luft– und Raumfahrt e.V.

FEEP Field Emission Electric Propulsion

ITP Institut für Technische Physik

LEO Low Earth Orbit

LISA Laser Interferometer Space Antenna

MEMS Microelectromechanical Systems

TFP Dünnpolymarisator

VLM Vaporizing Liquid Microthruster

Literaturverzeichnis

- [1] H. Dittus and T. van Zoest. Applications of Microthrusters for Satellite Missions and Formation Flights Scenarios. In *Seventh International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2011.
- [2] Laser Interferometer Space Antenna (LISA) Mission Concept. Technical report, ESA and NASA, 2009. Document Number: LISA-PRJ-RP-0001.
- [3] P. Amaro-Seoane, S. Aoudia, S. Babak, et al. Doing science with eLISA: Astrophysics and cosmology in the millihertz regime.
- [4] D. A. Gregory and K. A. Herren. Specific Impulse Definition for Ablative Laser Propulsion. In *Third International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2004.
- [5] L. Jolivet and B. Debray. Field Emission Electric Propulsion Plume Effects On Microscope Satellite.
- [6] L. Paita, F. Ceccanti, M. Spurio, et al. Alta’s FT-150 FEEP Microthruster: Development and Qualification Status. In *Proceedings of the 31st International Electric Propulsion Conference*, 2009.
- [7] M. Tajmar, A. Genovese, and W. Steiger. Indium FEEP Microthruster Experimental Characterization. Technical report, ARC Seibersdorf.
- [8] J. Müller, C. Marrese, J. Polk, et al. An Overview of MEMS-based Micropropulsion Developments at JPL. Technical report, Jet Propulsion Laboratory.
- [9] C. R. Phipps and J. R. Luke. 3ks Specific Impulse with a ns-pulse Laser Microthruster. In *Proceedings of the 29th International Electric Propulsion Conference*, 2005.
- [10] B. Esmiller and C. Jacqueland. CLEANSPACE “Small Debris Removal By Laser Illumination And Complementary Technologies”. In *Seventh International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2011.
- [11] S. Karg, S. Scharring, and H.-A. Eckel. Microthruster Research Activities at DLR Stuttgart - Status and Perspective. In *7th International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2011.

- [12] N. Dahms. Charakterisierung von elektro-optischen (KTN) 1D Strahlsteuermodulen zur anschließenden Umsetzung einer 2D Strahlsteuerung für laser-ablative Mikroantriebe. Master's thesis, Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg, voraussichtlich September 2014.
- [13] S Karg, S Scharring, and H.-A. Eckel. Laser Ablation Investigations for Future Microthrusters. In *International Symposium on High Power Laser Ablation*, 2012.
- [14] C. Illg. Plasmacharakterisierung für laserablative Satelliten-Mikroantriebe. Master's thesis, Universität Stuttgart, 2013.
- [15] V. Fedotov. Entwicklung und Konstruktion einer Schubwaage zur Charakterisierung laser-ablativer Mikroantriebe für die Raumfahrt. Master's thesis, Karlsruher Institut für Technologie, 2012.
- [16] N. P. Selden and A. D. Ketsdever. Comparison of force balance calibration techniques for the nano-Newton range. *Review of Scientific Instruments*, 74:5249–5254, 2003.
- [17] J. K. Ziemer. Performance Measurements Using a Sub-Micronewton Resolution Thrust Stand. In *Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference*, 2001.
- [18] A. P. Pancotti, M. Gilpin, and M. S. Hilario. Comparison of electrostatic fins with piezoelectric impact hammer techniques to extend impulse calibration range of a torsional thrust stand. *Review of Scientific Instruments*, 83, 2012.
- [19] M. Gamero-Castaño, V. Hruby, and M. Martínez-Sánchez. A Torsional Balance that Resolves Sub-micro-Newton Forces. In *Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference*, 2001.
- [20] S. Rocca, C. Menon, and D. Nicolini. FEEP micro-thrust balance characterization and testing. *Measurement Science and Technology*, 17:711–718, 2006.
- [21] S. Cesare, F. Musso, F. D'Angelo, et al. Nanobalance: the European balance for micro-propulsion. In *Proceedings of the 31st International Electric Propulsion Conference*, 2009.
- [22] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism Vol. 2*. Oxford, 1873.
- [23] P. Lebedew. Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes. *Annalen der Physik*, 311:433–458, 1901.
- [24] E. F. Nichols and G. F. Hull. Über Strahlungsdruck. *Annalen der Physik*, 317: 225–263, 1903.
- [25] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands. *Feynman-Vorlesungen über Physik - Bd. 1*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2001.

- [26] C. Stewen. *Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung*. PhD thesis, Universität Stuttgart, 2000.
- [27] A. Voß. *Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse*. PhD thesis, Universität Stuttgart, 2002.
- [28] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch, and H. Schmidt. *Optik für Ingenieure*. Springer-Verlag, 2002.
- [29] J. Mende, E. Schmid, J. Speiser, et al. Thin-disk laser – Power scaling to the kW regime in fundamental mode operation. In *Proceedings of SPIE 7193*, 2009.
- [30] V. Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability. 25:107–117, 1986.
- [31] J. T. Hunt, A. Glaze, W. W. Simmons, and P. A. Renard. Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging. *Applied Optics*, 17: 2053–2057, 1978.
- [32] P. A. Williams, J. A. Hadler, R. Lee, et al. Use of radiation pressure for measurement of high-power laser emission. *Optics Letters*, 38:4248–4251, 2013.
- [33] G. Roosen and C. Imbert. Absolute measurement of laser beam energy using its radiation pressure force. *Optical Engineering*, 20:437–439, 1981.
- [34] Ophir Photonics. <http://www.ophiropt.com/laser-measurement-instruments/laser-power-energy-meters/tutorial/types-of-powerenergy-sensors>. Online; accessed 26-August-2013.
- [35] J. Wallace. <http://www.laserfocusworld.com/articles/2013/09/ophir-photonics-unveils-100-kw-laser-power-meter-first-unit-is-already-in-use.html>.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Skizze des Orbits der LISA-Satelliten [2]	2
1.2	Konzept eines laser-ablativen Mikroantriebs (nach [11])	4
1.3	Gütefaktoren	5
2.1	Wirkung der Lorentzkraft auf eine bewegte Ladung (nach [25])	7
2.2	Prinzipskizze eines axial gepumpten Scheibenlasers (nach [26])	9
2.3	Energieniveauschemata (nach [27])	10
2.4	Prinzip der Relayabbildung	11
2.5	Balken der Schubwaage	13
3.1	Skizze der Laserresonatoren	15
3.2	Skizze des vereinfachten V-Resonators	16
3.3	Skizze des vereinfachten V-Resonators mit integriertem Relayteleskop . .	17
3.4	Simulation des Resonators im Intracavity-Modus	18
3.5	Simulation des Resonators im Extracavity-Modus	19
3.6	Foto des Lasermodus	20
3.7	Foto des experimentellen Aufbaus	21
3.8	Foto der Analysewaage im Aufbau	22
3.9	CAD-Modelle der konstruierten Spiegelhalter (a: Analysewaage; b: Schub- waage)	23
3.10	Foto der Schubwaage im Aufbau	24
4.1	Abschätzung der erzielbaren Leistungen und Schubkräfte im Extracavity- und Intracavity-Modus	28
4.2	Schubkraft in Abhängigkeit des Diodenstroms	30
4.3	Schubkraft in Abhängigkeit des Diodenstroms bei kurzer und längerer Strahlzeit	31
4.4	Ausschnitt der Ausgangsspannung des Entfernungssensors und Fit der Funktion	33
4.5	Kraftkonstanten der Tauchspulen in Abhängigkeit der Hublage	35
4.6	Vergleich der durch Leistungs- und Abstandsmessung berechneten Kräfte im Open-Loop-Betrieb (Intracavity-Modus)	37
4.7	Vergleich der durch Leistungs- und Strommessung berechneten Drehmo- mente im Closed-Loop-Betrieb (Intracavity-Modus)	39
4.8	Vergleich der Kräfte im Open-Loop-Betrieb des Extracavity-Modus . . .	40
4.9	Vergleich der Drehmomente im Closed-Loop-Betrieb des Extracavity-Modus	41

5.1	Abhängigkeit des aufgetragenen Drehmoments von der ausgegebenen Spannung des kapazitiven Abstandssensors	45
5.2	Abhängigkeit des aufgetragenen Drehmoments von der Stromstärke der rückstellenden Spule	46
5.3	Die im Open-Loop-Betrieb ermittelten Kalibrationsgleichungen im Vergleich	47
5.4	Die im Closed-Loop-Betrieb ermittelten Kalibrationsgleichungen im Vergleich	48
6.1	Schematische Skizze eines kalorimetrischen Leistungsmesskopfs (nach[34])	55

Tabellenverzeichnis

3.1	Geeignete Parameter für Intracavity-Modus	17
4.1	Messwerte zur Bestimmung der Transmissivität des Auskoppelspiegels . .	27
4.2	Ausgangsleistung in Abhängigkeit des Diodenstroms	27
5.1	Kraftbereich und kleinstes Schubinkrement der Kalibriermethoden	50

Erklärungen

Eidesstattliche Erklärung:

Ich versichere hiermit, die vorliegende Arbeit in dem gemeldeten Zeitraum ohne fremde Hilfe verfasst und mich keiner anderen als der angegebenen Hilfsmittel und Quellen bedient zu haben.

Koblenz, den 15.05.2014

Torben Sehnert

Weitergabeerklärung:

Ich erkläre hiermit mein Einverständnis, dass das vorliegende Exemplar meiner Master-Thesis oder eine Kopie hiervon für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden darf.

Koblenz, den 15.05.2014

Torben Sehnert

Sperrvermerk

Die Einsicht in die vorgelegte Arbeit unterliegt keinem Sperrvermerk.

Danksagung

Mein Dank geht an alle, die zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen haben.

Vor allem Frau Stephanie Karg für die gute Betreuung und dauerhafte Unterstützung bei sowohl theoretischen als auch praktischen Fragestellungen während meiner Zeit beim DLR.

Des Weiteren danke ich Dr. Jens Mende für die Bereitstellung des Laserdesigns, der Hilfe bei kritischen Messungen und für die zahlreichen interessanten Diskussionen zum Thema.

Ein weiterer Dank geht an Dr. Hans-Albert Eckel für die Ermöglichung der Masterthesis.

Außerdem danke ich den elektrischen und mechanischen Werkstätten des Instituts für die Fertigung verschiedenster Bauteile.

Danke an Prof. Dr. Thomas Wilhein für die hochschulseitige Betreuung dieser Arbeit und Prof. Dr. Jens Bongartz für die Bereitstellung als Zweitprüfer.